

Dominik Krišák

# Vliv teploty pláštěů vozidel na jejich charakteristické vlastnosti

## Influence of Vehicle Tires Temperature on Their Characteristics

Bakalářská práce

Vedoucí práce

Ing. Jakub Šmiraus, Ph.D.

Ostrava 2021

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 17. května 2021

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 17. května 2021.

Jméno a příjmení autora práce: Dominik Krišák

Adresa trvalého pobytu autora práce: Čajkovského 833/1, Havířov-Město, 73601

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KRIŠÁK, D. *Vliv teploty plášťů vozidel na jejich charakteristické vlastnosti: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2021, 55 s. Vedoucí práce: Šmiraus, J.

Hlavním cílem práce je seznámení s problematikou vlastností vozidlových pneumatik, rozlišení a objasnění základních pojmů týkajících se jejich vlastností a konstrukce. Dále vytvoření jednoduchého a v praxi velmi rychle použitelného výpočtového modelu, který usnadní práci s pneumatikami. Zejména predikci jejich tlaku v závislosti na teplotě s cílem maximalizovat požadované výkony pneumatiky ve vztahu k přenosu sil, ale také ve vztahu k životnosti, popř. jízdního komfortu. Údaje zjištěné a prokázané v praktické části pak mohou sloužit k rozvíjení studijních opor jak pro školy, tak i pro autoškoly nebo školitele bezpečnostních složek nebo pro využití v motoristickém sportu.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KRIŠÁK, D. *Influence of Vehicle Tires Temperature on Their Characteristics: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of transport, 2021, 55 p. Thesis head: Šmiraus, J.

The main goal of this work is introduction to the issue of properties of vehicle tires, distinction and clarification of basic concepts about tire construction and properties. Also create simple and in practice very fast, applicable computational model, which ease the work with tires. Mostly prediction of tire pressure according to tire temperature, with main goal to maximize tire force transfer performance, but also tire lifespan and driving comfort. Data collected and proven in practical part can be used to further develop study materials for schools, driving schools, security forces trainers or be used in motorsport.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	
1 Úvod do problematiky .....	1
2 Konstrukce vozidlových plášťů a jejich charakteristické vlastnosti .....	2
2.1 Historie .....	2
2.2 Konstrukce pneumatiky .....	2
2.3 Typy pneumatik .....	5
2.4 Dezén pneumatiky .....	7
2.5 Značení pneumatik .....	9
2.6 Vlastnosti pneumatik .....	11
2.7 Stárnutí pneumatik .....	16
2.8 Skladování pneumatik .....	17
2.9 Vliv tlaku v plášti na jeho vlastnosti .....	18
2.10 Vliv teploty pláště na jeho vlastnosti .....	18
3 Výpočet změny tlaku v pneumatice vlivem změn teploty .....	20
3.1 Matematické modelování vlastností pneumatik .....	20
3.1.1 Rozdělení modelů pneumatik dle účelu a přístupu k tvorbě modelu .....	20
3.1.2 Podmínky či oblasti použití modelu .....	21
3.1.3 Složitost modelu .....	22
3.1.4 Příklady modelů pneumatik .....	22
3.2 Výpočet na základě termomechaniky .....	23
3.2.1 Aplikace Stavové rovnice ideálního plynu .....	24
3.2.2 Aplikace Charlesova zákona .....	27
4. Validace výpočtu pomocí experimentu měření .....	29
4.1 Měření vlastností pneumatiky nákladního vozidla .....	29
4.1.1 Úvod měření .....	29
4.1.2 Subjekt měření .....	29
4.1.3 Měřicí přístroje .....	31
4.1.4 Průběh měření .....	32
4.2 Měření vlastností pneumatiky vozu Formula Student .....	36
4.2.1 Úvod měření .....	36
4.2.2 Subjekt měření .....	36
4.2.3 Měřicí přístroje .....	37
4.2.4 Průběh měření .....	38
5 Popis předpokládaných změn souvisejících se změnou tlaku v pneumatice ....	42
5.1 Změny tlaku pneumatiky u nákladního vozidla .....	42
5.2 Změna tlaku u pneumatiky pro monopost Formula Student .....	45

<b>6 Závěr .....</b>	<b>48</b>
<b>6.1 Shrnutí.....</b>	<b>48</b>
<b>6.2 Závěrečná doporučení .....</b>	<b>50</b>
<b>6.3 Využitelnost výsledků a doporučení pro další rozvoj problematiky.....</b>	<b>51</b>
<b>7 Seznam použité literatury .....</b>	<b>54</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

Boční (axiální) tuhost pneumatiky	$C_y$	[N/mm]
Délka ramena	$e$	[mm]
Index nosnosti	$LI$	[-]
Jmenovité zatížení	$F_{zj}$	[N]
Kategorie rychlosti	$SI$	[-]
Korekční součinitel tlaku v pneumatice	$\gamma$	[1]
Látkové množství plynu	$n$	[mol]
Molární plynová konstanta	$R$	[J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
Moment na obvodu kola	$M_k$	[N·mm]
Moment síly	$M_f$	[N·mm]
Objem systému	$V$	[m <sup>3</sup> ]
Objem vzduchu v pneumatice	$V_{vzd}$	[m <sup>3</sup> ]
Odpor valení	$O_f$	[N]
Počáteční tlak v systému	$p$	[Pa]
Pokles tlaku za jedno měření	$P_{pokles}$	[bar]
Poloměr kola	$r_d$	[m]
Posuv podložky	$\Delta x$	[mm]
Procentuální změna tlaku	$\Delta p_{p\%}$	[%]
Radiální reakce podložky	$F_{zk}$	[N]
Radiální síla	$F_z$	[N]
Radiální tuhost pneumatiky	$c_z$	[N/mm]
Rozdíl tlaku v pneumatice v barech	$\Delta p_{pbar}$	[bar]
Součinitel odporu valení	$f$	[1]
Statický poloměr pneumatiky	$r_s$	[N/mm]
Tečná síla	$F_x$	[N]
Teplota na konci změny	$T_2$	[°C]
Teplota na začátku změny	$T_1$	[°C]
Teplota pneumatiky	$T_{pneu}$	[°K]
Teplota pneumatiky po zahřátí	$T_{p2}$	[°C]
Teplota pneumatiky po změně	$T_{pneu2}$	[°K]
Teplota pneumatiky před zahřátím	$T_{p1}$	[°C]

Teplota v systému	$T$	[°K]
Tíha vozidla	$G_v$	[N]
Tlak na konci změny	$p_2$	[bar]
Tlak na začátku změny	$p_1$	[bar]
Tlak pneumatiky po zahřátí	$p_{p2}$	[N/mm]
Tlak v pneumatice	$p_{pneu}$	[Pa]
Tlak v pneumatice po změně	$p_{pneu2}$	[Pa]
Tlak v pneumatice před zahřátím	$p_{p1}$	[bar]
Tlak v pneumatice při optimální provozní teplotě	$p_{opt}$	[bar]
Torzní tuhost pneumatiky	$C_x$	[N/mm]
Úhel sklonu vozovky	$\alpha$	[°]
Úhlové natočení ráfku	$\Delta\varphi$	[°]
Výchozí teplota pneumatiky	$T_{pneu1}$	[°K]
Výchozí tlak pneumatiky	$p_{vých}$	[bar]



# 1 Úvod do problematiky

Moderní vozidla jsou velmi komplexní zařízení obsahující mnoho bezpečnostních, komunikačních a řídicích systémů. V současnosti je velmi sledovaná problematika emisí a pohonů vozidel ve vztahu k obnovitelným zdrojům energie. Konstrukce vozu je také zásadně ovlivňována bezpečnostními požadavky což je uvedeno například i v Bíle knize – plánu jednotného evropského dopravního prostoru. Velmi málo je však uváděno a v povědomí široké veřejnosti známo, že právě pneumatika je základním kamenem jak energické náročnosti vozidel, tak i bezpečnosti jejich provozu.

Plášť je komponentem vozidlového podvozku, která přenáší veškeré síly plynoucí z pohybu vozidla a zprostředkovává styk mezi vozidlem a povrchem po kterém se pohybuje. Pneumatika je hraničním prvkem v sériové soustavě ať už pohonu nebo například funkce brzdných asistentů, který rozhoduje o účinnosti této soustavy zcela zásadně.

Dle normy ČSN 63 1001 jsou základní pojmy objevující se v práci definovány takto:

- **pneumatika** – plášť, popřípadě i s duší, vložkou, nebo s bezdušovým ventilem, namontovaný na ráfek a naplněný tlakovým médiem,
- **plášť pneumatiky** – pružná vnější část pneumatiky, která zajišťuje styk s vozovkou a která svou patkovou částí dosedá na ráfek,
- **bezdušová pneumatika** – plášť (který je na ráfku s ventilem a nahuštěn na příslušný tlak) se speciální pryžovou vrstvou na vnitřním nebo vnějším povrchu, která přejímá funkci duše při nahuštění pneumatiky,

detailnější informace ohledně názvosloví jsou dohledatelné z tohoto zdroje [8].

## 2 Konstrukce vozidlových plášťů a jejich charakteristické vlastnosti

### 2.1 Historie

Plášť vozidel je svrchní část kola, která se dotýká vozovky. V minulosti to mohlo být dřevo u dřevěných kol, dále pak obruče z různých kovů až k pneumatikám. Roku 1839 Charles Goodyear objevil proces vulkanizace přidáním síry do roztaveného latexu tím vznikl vulkanizovaný kaučuk, který byl vhodný pro vytvoření prvních pneumatik. Brzy po tomto objevu se objevily celistvé pneumatiky, ty se však ukázaly jako nevhodné pro velká vozidla. Dnes se s nimi můžeme setkat například u nákupních košíků.

Na první pneumatiky s vnitřní vzduchovou výplní dostal patent Robert W. Thomson v roce 1845. Nicméně tento patent předběhl dobu a neuchytil se. Roku 1888 se John Boyd Dunlop stal druhým vynálezcem tohoto typu pneumatiky, tentokrát se patent uchytil, jelikož se rozšířila jízdní kola a lehčí pneumatika poskytovala o mnoho lepší jízdní vlastnosti.

Kompozitní pneumatiky s ocelovými kordy, jak je známe dnes se objevily v roce 1948 v Evropě. Pneumatika je tužší a její výhoda je v delší životnosti, lepší ovladatelnosti a menší spotřebě paliva v důsledku menšího valivého odporu [12].

### 2.2 Konstrukce pneumatiky

Pneumatika a její plášť jsou nejdůležitějšími částmi vozidla ve smyslu přenosu sil mezi automobilem a vozovkou, jak již bylo zmíněno v úvodu práce. Vlivem její konstrukce se mění nejen jízdní vlastnosti, ale také komfort a v neposlední řadě také bezpečnost jízdy. Jako pneumatika je označován celek složený z pláště, duše s ventilkem, přes který se vhání do pneumatiky vzduch a ochranné vložky. U bezdušových pneumatik je ventilek umístěn přímo v ráfku, zde pak není přítomna duše a ochranná vložka. Detailněji se konstrukcí pneumatiky zabývají tyto literatury [2] [4].

Pneumatiku lze také zjednodušeně popsat jako kompozit pryže vyztužený vlákny a drátem. Toto je přibližné složení materiálů pneumatiky:

- **pryž**
  - kaučuk (přírodní, syntetický),
  - plnidla (saze, silika),
  - změkčovadla (minerální oleje, pryskyřice),
  - vulkanizační činidla (prášková síra),
  - zpevňovací látky (kovová vlákna, umělé hedvábí, nylon),
  - chemické látky,
  - ostatní látky,

- **kordové tkaniny (vlákna)**

- Polyamid PA 6 (nákladní a zemědělské pneumatiky),
- PA 6.6 (nákladní a osobní pneumatiky),
- Polyester (Osobní a lehké nákladní pneumatiky),
- viskóзовé vlákno – RAY (Rayon) (vysokorychlostní pneumatiky),
- Aramid (sportovní, závodní pneumatiky),

samozřejmě každý výrobce má své poměry a složení, které upravuje pro dosažení co nejlepších vlastností, a zároveň si ho velice dobře střeží [20].

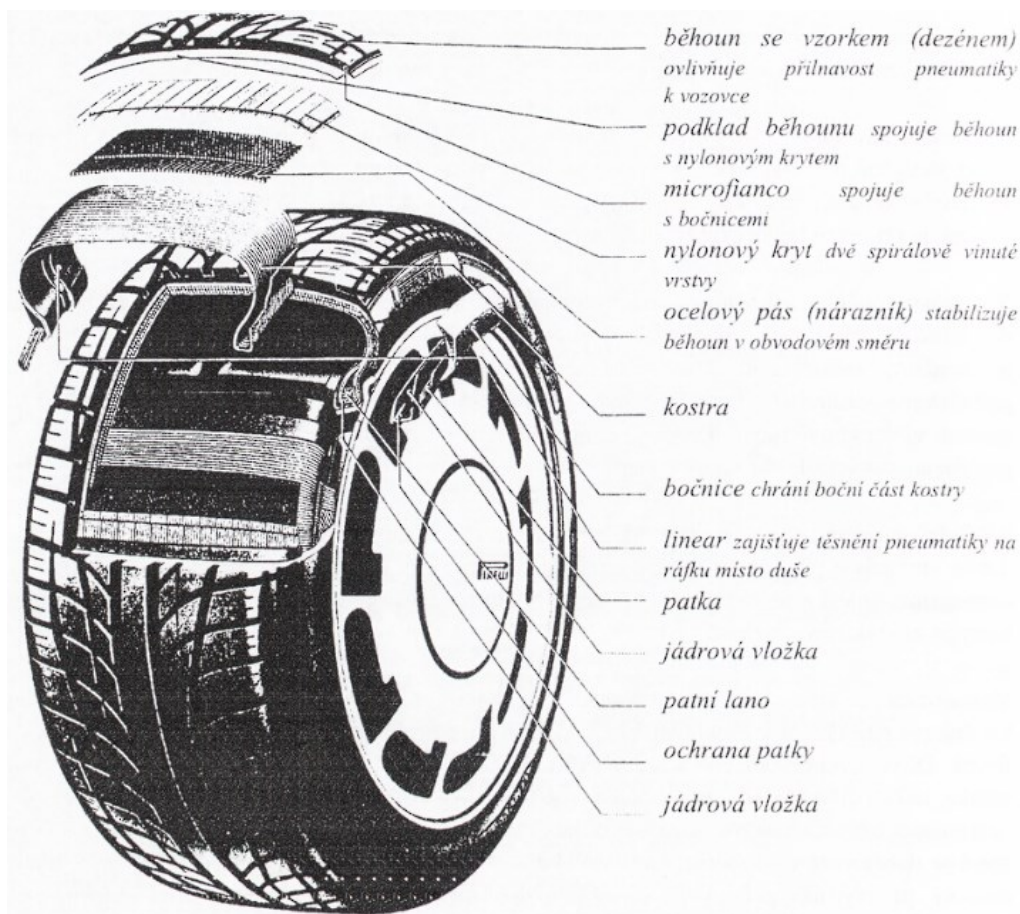
Bližší informace ohledně vlastností jednotlivých složek lze dohledat v odborné publikaci z tohoto zdroje [19].

Další složkou je:

- **ocelový kord**

- spletené lanko z drátů nebo jemnějších spletenců z pomosazené oceli,
- mohou být také plasty nebo kevlar.

Hlavní podíl pneumatiky tvoří kaučuk, který je složkou kaučukové směsi. Jedná se o kaučuk buď přírodní, který se převážně používá pro pláště nákladních vozů, nebo syntetický, který se převážně používá pro osobní vozy. Vulkanizací této směsi vzniká pryž, jejíž vlastnosti ovlivňuje dávka činidel přidaná před vulkanizací. Jde o proces reakce se sírou, která probíhá při samotném lisování pláště. Důležitou složkou jsou také plnidla, které se vážou s kaučukem a ovlivňují jednak výsledné vlastnosti, ale také odolnost proti odírání. Převážně se jedná o saze nebo místo nich je nyní možno užít kyselinu křemičitou (silika). Po zvulkanizování a spojení ostatních částí vznikne pneumatika [1].



Obrázek 1 - Složení pneumatiky [1]

Jednotlivými částmi pneumatiky jsou:

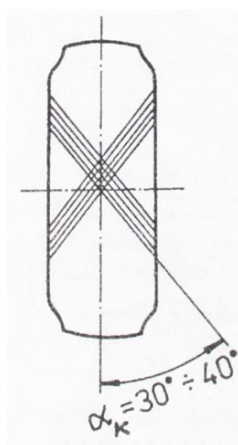
- **Kostra pláště** – určuje většinu nejdůležitějších vlastností pneumatiky, především jízdní vlastnosti, nosnost, tvar, odolnost atd. Tvoří ji vlákna z textilie, jejíž vlastnosti a kladení ovlivňují výše zmíněné atributy.
- **Vnitřní vložka** – funguje jako duše u bezdušových pneumatik. Zajišťuje především vzduchotěsnost, ale může nést i speciální materiály v oblasti běhounu pro snížení hluku během jízdy nebo zacelení menších vpichů bez ztráty tlaku.
- **Patka pláště** – vyztužená část pláště, která přenáší především točivý moment a brzdou sílu. Dosedá na ráfek. Vzniká zahnutím kordových vložek okolo patních lan pneumatiky.
- **Patní lana** – vyztužují patku, zajišťují správné dosednutí na ráfek a přidržují pneumatiku k němu. Jsou vyrobené z ocelového drátu. U pneumatik pro nákladní vozidla se používají dvě lanka pro větší vyztužení.

- **Bočnice** – chrání pneumatiku především proti bočnímu poškození. Může se měnit její tuhost v závislosti na typu pláště (vyztužená u plášťů typu Runflat, flexibilní u závodních pneumatik).
- **Nárazníky (koruna)** – je část mezi běhounem a kostrou, která má za úkol udržovat běhoun stabilní na obvodu a zvýšit odolnost pláště proti průrazu. Lanka z oceli kříží tkaninu na plášti pod úhlem  $60^\circ$  a tvoří „trojúhelníky“. Obepínají plášť a tvoří obvodovou pevnost. U pneumatik pro osobní automobily je tvořen dvěma vrstvami, u nákladních se používají v průměru tři až čtyři vrstvy.
- **Běhoun** – svrchní část pneumatiky, která je v přímém kontaktu s vozovkou. Nese na sobě vzorek, který svým provedením ovlivňuje především adhezi a odvádění tepla. U nákladních automobilů může být konstruován i pro opakované prořezání dezénu [1].

## 2.3 Typy pneumatik

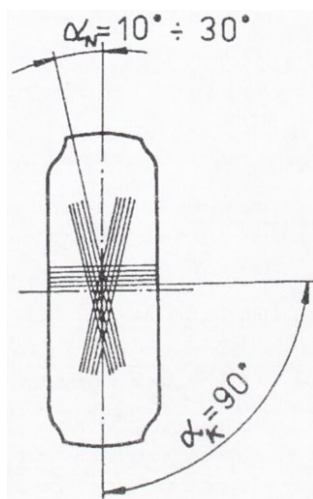
Rozlišujeme tyto typy pneumatik:

- **Diagonální pneumatika** – její kostru tvoří páry kordových vložek (vždy sudý počet). Jejich počet také určuje rozměry a nosnost pneumatiky. Orientace vláken je vždy menší než  $90^\circ$  (nejčastěji  $30^\circ$  až  $40^\circ$ ). Vlákná sousedních vložek se kříží a pokračují až pod patkovou lanku, kolem kterých jsou zahnuta, což znamená že každý bod kostry pláště je k patkám kotven dvěma vlákny. Lze si představit že vlákna ubíhají šikmo od patky k patce. Vlákná přenášejí příčné a obvodové síly do patky pláště. Při zatížení pláště dochází k jeho deformaci, kde se vlákna neprodlužují, ale posunují čímž namáhají pryž mezi nimi na stříh. Tím vzniká teplo, což znamená ztráty [3].



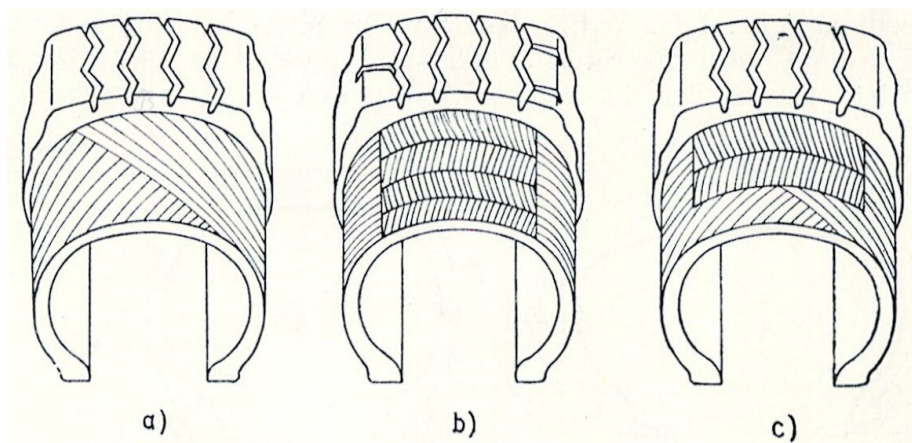
Obrázek 2 - Uložení kordových nití nosné struktury diagonální pneumatiky [1]

- **Radiální pneumatika** – nemá vlákna kordových vložek zkřížená, ale jsou pokladena pod úhlem blízkým  $90^\circ$  ( $+0, -5$ )  $^\circ$  vzhledem k podélné rovině symetrie běhounu. Lze si představit tak že vlákna ubíhají od patky k patce kolmo na směr otáčení kola. Počet vložek může být i jiný než sudý. Tato část kostry přenáší radiální a boční síly, avšak schopnost přenášet obvodové síly je malá, musí být kostra podpořena obvodově neroztažitelným pásem, tzv. nárazníkem. Ten přenáší obvodové síly po celém obvodu ráfku. Bočnice pneumatiky jsou měkčí, nárazník je v bočním směru ohybově poměrně tuhý. Protože vývin tepla je způsoben zejména podélným ohybem kordových vláken a pryže s nimi spojené v nárazníku, je nižší než u diagonálních pneumatik. Plášť si zachovává velkou styčnou plochu i při malém zatížení, a při zatížení roste styčná plocha pouze v podélném směru, zatímco šířka stopy se nemění. Radiální pneumatiky jsou složitější na výrobu, jelikož vyžadují více operací a také jsou i nich větší nároky na přesnost. Proto bývají dražší než diagonální [3].



Obrázek 3 - Uložení kordových nití nosné struktury radiální pneumatiky [1]

- **Pneumatiky smíšené konstrukce** – tzv. Bias-belted, jedná se o kompromis mezi vlastnosti dvou výše zmíněných typů pneumatik. Kostra je podobná pneumatice diagonální, kde jsou vlákna pod úhlem obvykle větším než  $60^\circ$  a je zpevněná pásem ze dvou nebo více vrstev nárazníkového kordu, který je uložen pod střídavým úhlem, obvykle menším než  $25^\circ$  [3].



Obrázek 4 [2] - Základní konstrukční typy plášťů pneumatik

a – diagonální, b – radiální, c – smíšené konstrukce

## 2.4 Dezén pneumatiky

Kde nalézt dezén již bylo zmíněno v odstavci 2.2 pojednávajícím o konstrukci pneumatiky. Většina pneumatik je opatřena dezénem, který se mění v závislosti na typu použití pneumatiky. Tvoří jej žlaby, které pneumatiku dělí na geometrické obrazce, nazývané též jako figury. Dezén a jeho provedení výrazně ovlivňuje jízdní vlastnosti, především přilnavost. Hlavní funkce žlabů je co nejrychleji a nejefektivněji odvést vodu ze stopy a vytvářet tak co nejlepší styk pneumatiky s vozovkou. Dezén s menší plností, jehož drážky jsou schopny odvést velké množství vody v krátkém časovém intervalu, ale je nevýhodný z hlediska většího opotřebení a větší hlučnosti. U všech pneumatik je tedy důležité najít kompromis rozměrů a provedení drážek na odvádění vody. Letní pneumatiky ztrácí během nižších teplot své vlastnosti, proto je potřeba včas přejít na zimní směs, která má jiný tvar dezénu a vlastnosti způsobené nižšími teplotami [1].

Minimální výška dezénu pro provoz na pozemních komunikacích v České republice je pak stanovena zákonem 133/2011 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů (zákon o silničním provozu), ve znění pozdějších předpisů, a některé další zákony. Ta je stanovena na 4 mm u zimních pneumatik pro vozidla do 3500 kg přípustné hmotnosti, 6 mm pro vozidla na 3500 kg přípustné hmotnosti. Tyto hodnoty jsou stanoveny pro správné fungování dezénu i na opotřebovaných pneumatikách. Detailnější informace lze dohledat z tohoto zdroje [7].

Rozlišujeme tyto tvary dezénů:

- **Symetrický** – běžná pneumatika za nižší cenu. Lze je na vozu, jakkoliv měnit a otáčet.



- **Směrový** – dezén má tvar šípů. Nutno dodržovat směr otáčení při montáži, který bývá vyznačen šipkou na bočnici, protože je vytvořen tak že své specifické vlastnosti má pouze v tomto směru. Výborně také odvádí vodu.
- **Asymetrický** – nutno dodržet vnitřní a vnější stranu pláště. Opět označeno na bočnici („inside“ a „outside“). Dezén je rozdělen do několika zón kde drážky jsou uzpůsobené pro optimální odebrání vody. Jsou vysoce odolné aquaplaningu a méně hlučné.
- **Asymetrický směrový** – převážně pneumatiky určené pro závody [1].



Obrázek 5 - Typy pneumatik

a – symetrický, b – směrový, c – asymetrický, d – asymetrický směrový

- **Hladký dezén (Slick)** – jedná se o speciální typ pneumatiky používaný výhradně pro závodní účely, jelikož pro provoz na pozemních komunikacích je jejich použití zakázáno. Díky absenci vzorku a velké kontaktní ploše je dosažena maximální možná trakce, nicméně pouze na suchém povrchu. Na mokřém povrchu dochází k aquaplaningu, jelikož voda nemá kam odtékat a vozidlo ztrácí přilnavost. Proto se musí během deště či mokra pneumatiky vyměnit za vhodné pro tyto podmínky.

Během závodu jsou tyto pneumatiky vystavovány intenzivnímu zahřívání v důsledku vysokých rychlostí v zatáčkách. Jsou konstruovány tak aby toto zahřívání vydrželi, nicméně je výrazně snížena jejich životnost (jeden závod – jedna pneumatika), která je také závislá na jízdním stylu pilota a povrchu po kterém se vozidlo pohybuje. Díky těmto okolnostem je také kladen větší důraz na tlak v pneumatice, který ovlivňuje vlastnosti pneumatiky. Například při nízkém tlaku má pneumatika větší styčnou plochu, opět pro maximální trakci za ceny zvýšeného opotřebení pneumatiky. Další informace jsou dohledatelné například z těchto zdrojů [13] [14] [21].





Obrázek 6 - Opotřebené pneumatiky Slick [13]

## 2.5 Značení pneumatik

Značení pneumatik je dáno třemi základními parametry:

- šířka profilu nezatížené nahuštěné pneumatiky B,
- výška jejího profilu H,
- průměr ráfku d.

V katalogích se můžeme setkat i z dalšími parametry:

- vnější průměr D,
- šířka nezatížené nahuštěné pneumatiky,
- statický poloměr pneumatiky  $r_s$ ,
- odvalený obvod (dráha odvalená pláštěm při jedné otáčce).

Důležitým údajem je tzv. profilové číslo. Jedná se o poměr výšku profilu ku šířce profilu  $H/B$ . Po vynásobení číslem 100 dostaneme tento údaj v %. Toto číslo se v průběhu let zmenšovalo. Zprvu se pohybovalo kolem 100 %, avšak s vývojem a novými technologiemi se dnes dostáváme i na hodnotu 30 %. Pneumatiky s nízkou hodnotou nazýváme nízkoprofilové, kde šířka převyšuje výšku profilu. Tyto pneumatiky mají vysokou cenu, vyšší nebezpečí aquaplaningu a také vyšší odpor vzduchu, avšak vůz může mít níže položené těžiště, lepší přilnavost a lepší brzdné vlastnosti. Jsou převážně použity na sportovních vozech či jako designový prvek automobilu.

Parametry vyskytující se v označení:

- **Index nosnosti (Load Index)** – maximální nosnost pneumatiky za daných specifických podmínek, při rychlosti, která je určena rychlostní kategorií pneumatiky

**Tabulka 1 - Typy pneumatik [1]**

LI (-)	50	60	70	80	90	100
Nosnost (kg)	190	250	335	450	600	800

- **Kategorie Rychlosti (Speed Index)** – maximální přípustnou provozní rychlost, kterou je možno se s touto pneumatikou bezpečně pohybovat.

**Tabulka 2 – Kategorie rychlosti [1]**

SI (-)	E	F	G	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	H
Rychlost (km/h)	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	210

- **PR (Ply Rating)** – udává počet tkaných složek, což udává pevnost kostry. Pro toto označení se používají sudá čísla 8–18.

Příklad označení pneumatik u osobních vozů:

**175/70 R 14 84 S**

- 175 – šířka pneumatiky v mm,
- 70 – profilové číslo,
- R – radiální konstrukce kostry,
- 14 – průměr ráfku v palcích (případně v mm),
- 84 – Index nosnosti (zde max. 500 kg.),
- S – Kategorie rychlosti (zde max. 180 km/h).

U pneumatik určených pro nákladní vozidla je značení podobné jako u pneumatik pro osobní vozy, rozdíl je v tom, že se neuvádí profilové číslo, ale udává se index nosnosti.

Příklad označení pneumatik u **lehkých** nákladních vozů:

**185 R 14 90 S**

- 90 – index nosnosti (zde 600 kg)

Následující značení je lehce odlišné od dvou, již výše uvedených, příklad značení u **nákladních** vozů:

**10.00 – R 20 16 PR**

- 10.00 – šířka v palcích,
- R 20 – průměr ráfku v palcích,
- 16 PR – označení nosnosti.

Označení na bočnici pneumatiky, ze kterými je nejčastěji možno se setkat:

- indikátor opotřebení TWI (Thread Wear Indicator) – udává informaci o stavu dezénu. Jedná se o výstupek v dezénu hraniční hloubku, která je u osobních automobilů stanovena na 1,6 mm,
- Tubeless (Bezdušová pneumatika),
- Tube Type (Pneumatika z duší),

detailnější informace jsou k dohledání z těchto zdrojů [1] [4].

## 2.6 Vlastnosti pneumatik

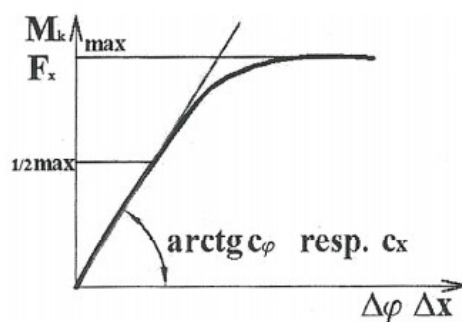
Mezi hlavní vlastnosti a funkce pneumatiky patří:

- **Přenos výkonu** – pomocí pneumatik se přenáší síla pohonného ústrojí, nebo síla při brzdění na vozovku. Tyto faktory jsou ovlivněny především stykovou plochou pneumatiky s povrchem.

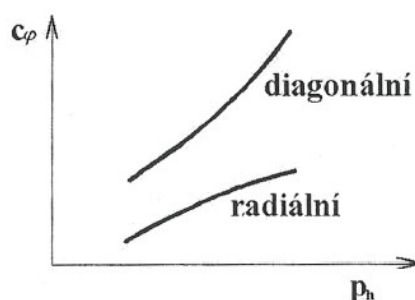
K tomuto se váže Torzní a obvodová charakteristika pneumatiky [3]:

- **Torzní charakteristika** se zjišťuje na kole s nepohyblivou osou, které je přitlačeno k nepohyblivé podložce. Ráfek kola je zatěžován momentem  $M_k$  a je zde měřeno úhlové natočení ráfků  $\Delta\varphi$ . Jde tedy o závislost zátěžového momentu na úhlu natočení ráfku  $M_k(\Delta\varphi)$ .
- **Obvodová charakteristika** je zjišťovaná na nepohyblivém kole, na které působí posuvná podložka radiální silou  $F_z$  a tečnou silou  $F_x$ . Je zde měřen posuv  $\Delta x$  a síla  $F_x$ . Jedná se tedy o závislost tečné síly na posuvu  $F_x(\Delta x)$ .

Oba způsoby měření dávají zpravidla rozdílné výsledky, nicméně průběhy charakteristik jsou si velice podobné, jak ukazuje graf 1. Směrnice tečny  $c_\varphi$  resp.  $c_x$  je torzní (obvodovou) tuhostí pneumatiky, která je konstruována v polovině maximální hodnoty průběhu momentu  $M_k$  resp. v polovině maximální hodnoty průběhu tečné síly  $F_x$ ). Závislost torzní tuhosti na tlaku pneumatiky ukazuje graf 2. Torzní tuhost je podstatně vyšší u diagonálních pneumatik než u pneumatik radiálních vlivem konstrukce kordové vrstvy. U diagonálních pneumatik také torzní (obvodová) tuhost podstatně více roste se zvyšováním tlaku huštění v pneumatice.



Graf 1 – Torzní (obvodová) tuhost pneumatiky [3]

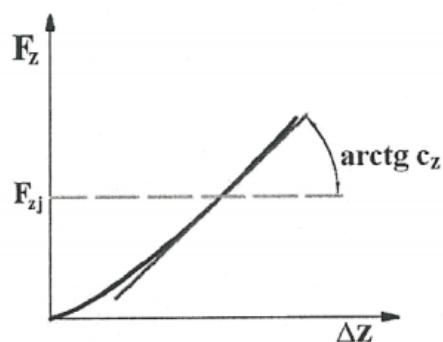


Graf 2 - Torzní tuhost pneumatiky v závislosti na tlaku huštění [3]

- **Tlumící schopnost** – spolu s tlumiči v podvozku vozidla pneumatiky snižují vibrace díky své pružnosti, která závisí na vnitřním tlaku pneumatiky. Pohlcuje nerovnosti či překážky, přes které vozidlo přejede. To má za výsledek prodloužení délky živostnosti ostatních součástí vozidla.

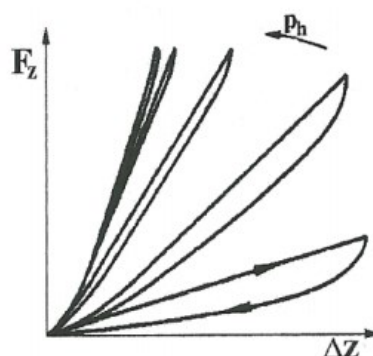
S tímto je spjata radiální deformační charakteristika [3]:

- **Radiální deformační charakteristika** vyjadřuje závislost mezi radiální silou v pneumatice  $F_z$  a radiální deformací  $\Delta z$ . Měří se na kole s radiálním zatížením v jeho ose na vodorovné podložce. Obecně je charakteristika nelineární, nicméně v oblasti jmenovitého zatížení  $F_{zj}$  ji lze linearizovat, jak naznačuje graf 3. Zde je směrnice tečny  $c_z$  nazývána radiální tuhostí pneumatiky. Radiální tuhost pneumatiky se mění v závislosti rychlosti jízdy vozidla.



Graf 3 - Radiální tuhost pneumatiky [3]

- **Úplná radiální deformační charakteristika** je získávána postupnými zatěžováními a odlehčováním pneumatiky. Ta má určitou hysterezi s plochou úměrnou ztrátové (teplené) energii. Tyto ztráty jsou způsobeny deformací pryže v důsledku jejich viskoelastických vlastností a také třením běhounu o podložku. Úplnou deformační charakteristiku s vlivem tlaku huštění ukazuje graf 4.

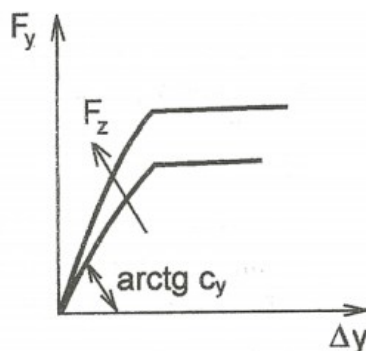


Graf 4 - Úplná radiální deformační charakteristika s vlivem tlaku huštění [3]

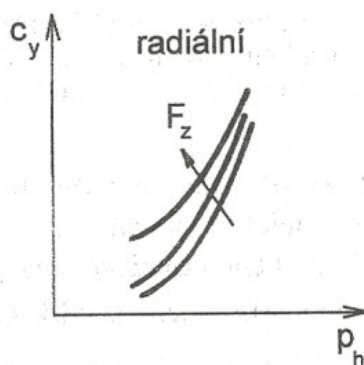
- **Řízení** – pokud má vozidlo špatnou přilnavost tak špatně zatáčí. Při správném nahuštění vozidlo drží směr a je stabilní. Pneumatika by měla být schopna vydržet příčné zatížení tak, aby nedošlo ke změně trajektorie.

S tímto souvisí **Boční (axiální) deformační charakteristika**, která je vyjádřena závislostí boční síly na pneumatice a boční deformace. Pneumatika se přitlačuje radiální silou na podložku a jejím posuvem je vytvářena boční deformace, přičemž je zaznamenávána boční reakční síla. Boční deformační charakteristika je zobrazena na grafu 5. Její závislosti na tlaku huštění pro radiální a diagonální pneumatiky ukazuje graf 6 a 7. Je patrné že z počátku je průběh téměř lineární.

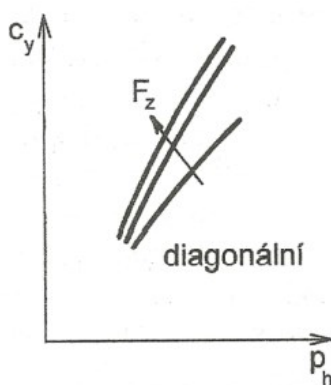
Směrnice této přímky je boční (axiální) tuhost pneumatiky  $c_y$ . Změna zvyšujícího se radiálního zatížení je v grafu označena  $F_z$  [3].



Graf 5 – Boční tuhosti pneumatiky [3]



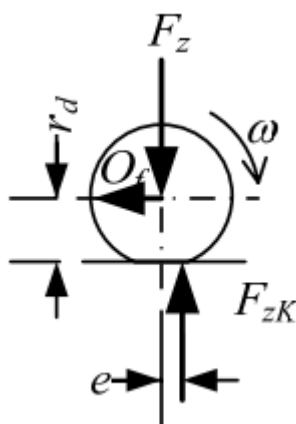
Graf 6 - Závislost boční tuhosti na tlaku huštění u radiální pneumatiky [3]



Graf 7 - Závislost boční tuhosti na tlaku huštění u diagonální pneumatiky [3]

- **Přenos hmotnosti (zatížení)** – při zrychlování či brždění se mění těžiště zátěže, zároveň také při naložení více osob či nákladu se zvyšuje tlak mezi vozovkou a pneumatikou. Únosnost je udávána až na několikanásobek vlastní hmotnosti pneumatiky v desítkách jednotek.

- **Odvalování (valivý odpor)** – zvýšený odpor valení či nerovnoměrnost odvalování vedou ke snížení komfortu a také zvýšení spotřeby. Odpor valení vzniká jako důsledek deformace pneumatik při styku kola s podložkou. Při styku kola s podložkou se tvoří plocha nazývaná stopa v jejíž přední části dochází ke stlačování pláště a v zadní části stopy pak k návratu pláště do kruhového tvaru. Radiální reakce podložky (vozovky)  $F_{zk}$  je přesunuta ve stopě dopředu ve směru jízdy o vzdálenost délky ramena  $e$ , jak je patrné z obrázku 7. Spolu se silou  $F_z$  tvoří tyto reakce silovou dvojici, která odpovídá momentu  $M_f$ . Z rovnováhy momentu valení a momentu který je tvořen silou odpovídající odporu valení je možno stanovit sílu která odpovídá odporu valení  $O_f$  [9].



Obrázek 7 - Silové působení při deformaci pláště [9]

Vztahy k odporu valení:

$$F_z \cdot e = O_f \cdot r_d \quad [\text{Nm}] \quad (1)$$

Kde:

$r_d$  [m] je poloměr kola

$e$  [m] je délka ramena

Odpor valení pak lze vyjádřit:

$$O_f = F_z \cdot \frac{e}{r_d} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

Pro vozidlo je pak možno sílu  $F_z$  vyjádřit takto:

$$F_z = G_v \cdot \cos \alpha \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Kde:

$\alpha$  [°] je úhel sklonu vozovky

$G_v$  [N] je tíha vozidla

Pak pro odpor valení platí:

$$O_f = F_z \cdot \frac{e}{r_d} = G_v \cdot \cos \alpha \cdot \frac{e}{r_d} = G_v \cdot \cos \alpha \cdot f \quad [\text{N}] \quad (4)$$

Kde:

$f$  [1] je součinitel odporu valení

**Tabulka 3 – Závislost velikost odporu valení na povrchu vozovky [9]**

Povrch vozovky	$f$ [1]	Povrch vozovky	$f$ [1]
beton	0,015 – 0,025	travnatý terén	0,080 – 0,150
asfalt	0,010 – 0,020	hluboký písek	0,150 – 0,300
dlažba	0,020 – 0,030	rozbahněná půda	0,200 – 0,400
makadam	0,030 – 0,040	čerstvý sníh	0,200 – 0,300
suchá vozová cesta	0,040 – 0,150	náledí	0,010 – 0,025
mokrý vozová cesta	0,080 – 0,200		

Bližší informace ohledně odporů působících proti pohybu vozidla lze dohledat z těchto zdrojů [9] [4].

- **Životnost** – opotřebení pláště závisí na mnoha faktorech, jedním z největších je však tlak v pneumatice. Ovlivňuje především velikost styčné plochy s vozovkou. Tlak ovšem se časem a teplotou mění v důsledku malých pórů, netěsnosti mezi ráfkem a pneumatikou či vadným ventilkem. Proto je tlak potřeba kontrolovat a pravidelně dohlašovat pneumatiku na hodnoty stanovené výrobcem [1].

Podrobnější informace ohledně vlastností a charakteristik pneumatik jsou dohledatelné například z těchto zdrojů [1] [3] [4].

## 2.7 Stárnutí pneumatik

Stárnutí pneumatik se dělí na dva hlavní způsoby:

- **Cyklické stárnutí pneumatik** – jakmile se pneumatika zahřeje, lehce zvulkanizuje a změní své vlastnosti. Nejlepší přilnavost poskytují nové pneumatiky, které se nejvíce ohřejí právě při první použití, jelikož uvnitř pneumatiky se vytváří tření a vnitřek pneumatiky se urovnává. S každým dalším cyklem se však mění vlastnosti pneumatiky k horšímu (tvrdší, méně flexibilní, méně přilnavé). U závodních pneumatik je maximální přilnavost žádána, proto je každá pneumatika použita pouze jednou. Tento proces je možno vidět na pneumatikách vozů F1 kdy ten samý



set pneumatik je použit poprvé v tréninku kde se pneumatiky „zajedou“ a podruhé jsou použity v závodě. Poté jsou tyto pláště zlikvidovány [10].

- **Přírozené stárnutí** – přírozené stárnutí pneumatik je důsledkem jejich používání v provozu za podmínek doporučených výrobcem pro jejich maximální životnost. Dále pak také vhodným skladováním, které je popsáno dále v práci [10].

## 2.8 Skladování pneumatik

Skladování pneumatik má také vliv na jejich vlastnosti a životnost. Proto by mělo být prováděno správně. Možností správného skladování je hned několik:

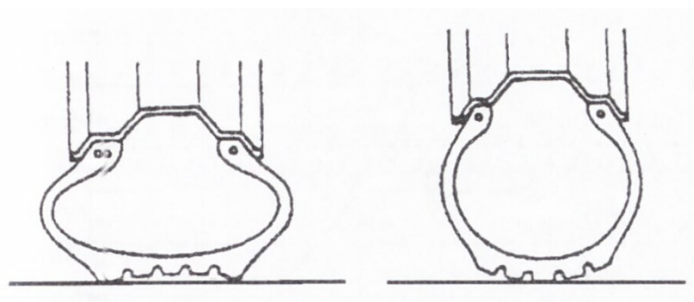
- **Skladování pneumatik v prodejně nebo odborném servisu** – pokud je to možné, jedná se o nejlepší možnost, jak pneumatiky skladovat. Jedná se o profesionální skladování, které většinou zahrnuje i pojištění a kontrolu zda – li nejsou pneumatiky poškozeny a jsou správně vyváženy.
- **Skladování pneumatik v soukromých prostorách** – pokud jsou pneumatiky skladovány v soukromých prostorách majitele, je potřeba se ujistit, aby skladovací prostory byly, suché, tmavé a chladné a pneumatiky byly očištěny. Dále by zde mělo být také zajištěno větrání. Pneumatikám škodí UV záření z přímého slunečního světla, které způsobuje předčasné stárnutí pneumatiky. Dále by také pneumatiky neměly přijít do styku s rozpouštědly, mazivy, chemikáliemi a podobně. Pneumatiky by také neměly být skladovány v blízkosti elektrických zařízení vytvářejících při své činnosti ozon, jelikož tento prvek má negativní vliv na pryžovou směs pneumatik.
- **Způsob skladování pneumatik** – pneumatiky by měli být správně nahuštěny. Poté mohou být na sebe naskládány, ovšem může dojít k jejich deformaci v důsledku ztráty tlaku v pneumatikách. Vhodné je také pneumatiky po měsíci přeskládat, aby bylo zajištěno rovnoměrného zatížení. Případnou alternativou je stojan na pneumatiky, který umožňuje skladovat pneumatiky šetrným a přehledným způsobem nebo pneumatiky zavěsit na držák, kdy je každé kolo chráněno před tlakovými a deformačními body. Pokud by tedy došlo ke ztrátě tlaku, nedojde k žádné deformaci. Nikdy však pneumatiky s ráfky nastavět vedle sebe, právě z důvodu vzniku tlakových a deformačních bodů a dále již zmíněných negativ.
- **Skladování pláštěů** – naopak v tomto případě skladování je doporučeno provádět na stojato vedle sebe, a čas od času pláště pootočit. Nedoporučuje se klást na sebe a zavěšovat z důvodu deformace pláště. Výrobci udávají že správně uskladněné pláště nemění své vlastnosti až po dobu pěti let.

Podrobné informace o skladování lze dohledat z těchto zdrojů [15] [21].

## 2.9 Vliv tlaku v plášti na jeho vlastnosti

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.6, nahuštění pneumatiky, resp. tlak v pneumatice má zásadní vliv na mnoho aspektu pláště. V pneumatice se postupně tlak mění a mohou nastat tyto situace:

- **Přehuštění** – k přehuštění dochází, když je v pneumatice vyšší tlak, než je hodnota doporučená výrobcem. Dochází ke kontaktu pouze střední části pneumatiky s vozovkou. To má za následek nadměrné opotřebení této části kdy krajní části pláště jsou téměř neopotřebovány. Pneumatika má také menší styčnou plochu, jízda se stává nekomfortní a je snížena kontrola nad vozidlem.
- **Podhuštění** – k podhuštění pneumatiky dochází častěji než k přehuštění. V tomto případě jsou více opotřebovány krajní části běhounu, kde se hromadí tlak. Pneumatika v tomto stavu má za následek zhoršené ovládání v důsledku nižší adheze, a také zvýšení spotřeby [1].



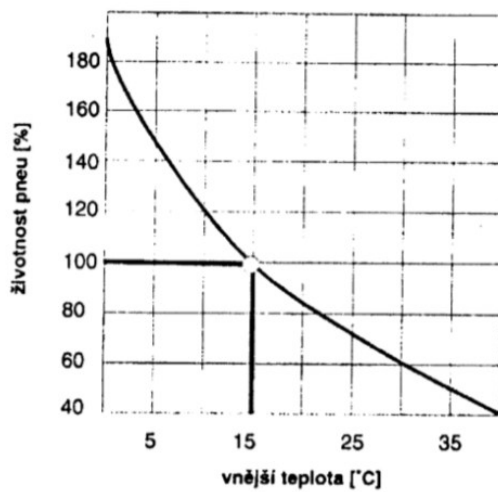
Obrázek 8 - Schématické znázornění podhuštěné (vlevo) a přehuštěné (vpravo) pneumatiky [1]

## 2.10 Vliv teploty pláště na jeho vlastnosti

Teplota pneumatiky je řešena v souvislosti s jejím použitím. Pokud se jedná o použití v motorsportu, jednoznačně rozhoduje kritérium adheze, tedy přilnavosti. Toto kritérium ovlivňuje zejména přenos obvodových a bočních sil mezi pláštěm a povrchem vozovky. Zjednodušeně, čím větší přilnavost, tím lepší ovladatelnost vozu. Co se týče komerčního použití pneumatik, jsou hlavními kritérii životnost pneumatik a také spotřeba paliva. Vysoká teplota má negativní vliv na životnost pneumatik. Klesá při ní síla vazby mezi jednotlivými složkami běhounu a snadněji dochází k jeho oděru.

Teplota pneumatiky může také indikovat další aspekty související s jízdou vozidla. Například pokud se pneumatika nezahřívá rovnoměrně, může být na vině špatná geometrie kol, či jiné problémy související s nastavením podvozku. Tyto problémy opět působí

negativně na životnost pneumatiky, nebo v motorsportu negativně na ovládání vozidla, což ústí v horší výsledky na trati [1].



Graf 8 - Vliv vnější teploty na životnost pneumatiky [1]

## 3 Výpočet změny tlaku v pneumatice vlivem změn teploty

### 3.1 Matematické modelování vlastností pneumatik

Pro jednoznačný popis vlastností a chování pneumatiky se zavádí mnoho veličin. Některé z nich jsou považovány jako výstup silového prvku pneumatika, ostatní jako vstupní veličiny a parametry. Mezi veličinami existují různé spojitosti a závislosti. Aby je bylo možné objektivně posuzovat, zkoumat vliv jednotlivých parametrů na tyto veličiny a také s nimi dále pracovat (používat jako vstupy pro další výpočty apod.), je vhodné a mnohdy nezbytné povést jejich popis pomocí matematických funkcí a závislostí, tedy vytvořit jejich matematický model.

Již od počátků studií pneumatik vzniklo mnoho modelů, které mohou být rozděleny dle různých hledisek. Tyto hlediska se často vzájemně ovlivňují. Obecné rozdělení matematických modelů pneumatiky můžeme provést dle těchto kritérií:

- účel, pro který je daný model pneumatiky navržen,
- přístup k tvorbě modelu,
- podmínky či oblast použití modelu,
- složitost daného modelu.

#### 3.1.1 Rozdělení modelů pneumatik dle účelu a přístupu k tvorbě modelu

Z tohoto hlediska lze modely rozdělit do čtyř kategorií:

##### a.) Modely určené pro použití v simulaci dynamiky jízdy vozidel

Model pneumatiky je zde částí nadřazeného modelu popisujícího dynamický systém vozidla. Zde je úkolem modelu pneumatiky přiřazovat vstupním hodnotám (silovým účinkům na pneumatiku) přiřazovat hodnoty výstupní. Mnoho parametrů závisí na složitosti a druhu použitého modelu, zatímco základní složky jsou zřejmé, tj. složky sil a momentů působících od pneumatiky na vozidlo ve směrech os souřadného systému nosiče kola. Modely této kategorie mají empirický základ, vycházejí převážně z dat získaných při měření na vozovce při podmínkách, které se co nejvíce blíží skutečnému provozu. Charakteristiky, které jsou takto naměřeny jsou pak popsány pomocí tabulek hodnot či matematickými funkcemi které jsou sestaveny tak aby se co nejvíce podobaly naměřeným průběhům. Typickým představitelem těchto modelů jsou tzv. „magické formule“ (magic formulas).

##### b.) Jednodušší modely základních principů chování pneumatiky a jejich vlastností

Tyto modely většinou vycházejí z fyzikálního modelu pneumatiky přiměřené složitosti a provádějí popis v uzavřeném tvaru. Vznikají tzv. podobnostní metodou (similarity method), kdy za pomoci zvláštních postupů se ze základních průběhů, které byly

naměřeny za nominálních podmínek odvodí popisy průběhů pro specifické podmínky. Modely těchto výše zmíněných kategorií se obzvláště hodí pro simulace dynamiky jízdy vozidel, jsou-li modely používány za podmínek pro které byli sestaveny. Vyznačují se velmi dobrou přesností, zejména proto, že jsou to matematicky popsané skutečnosti. Na druhou stranu teoretické modely vznikají v opačném smyslu. Vycházejí z teorie a pokouší se co nejlépe přiblížit skutečnosti. Stupeň přiblížení je pak třeba ověřit porovnáním výsledků modelů s experimenty, tedy provést validaci modelu.

**c.) Složité teoretické modely pro detailní zkoumání vlastností pneumatik, vlivu změn konstrukčních parametrů atd.**

Modely takto vytvořeny bývají využívány ve výzkumu a konstrukci pneumatik. Především tedy výrobci pneumatik. Sdružuje matematické popisy pneumatik, které vznikly na základě teoretických postupů jednoduchých fyzikálních modelů pneumatik. Toto splňují modely spadající pod kategorii b.). Dle typu fyzikálního modelu mohou však i jednoduché popisy základních principů chování pneumatiky poskytnout dostatečnou přesnost, a tedy mohou některé z těchto modelů posloužit pro simulace dynamiky jízdy vozidel.

**d.) Pokročilé teoretické modely**

Nejčastěji slouží k detailním analýzám chování pneumatiky. Typickým představitelem této kategorie jsou modely na bázi metody konečných prvků (MKP). S pomocí dnešní výpočetní techniky umožňují efektivně využít tyto metody a je možnost hledat nové, komplexnější postupy v modelování kontaktu pneumatiky s podložkou. Metodou konečných prvků lze modelovat jak pneumatiku, tak i podložku, což umožňuje řešit chování poddajné pneumatiky na poddajném povrchu apod.

### **3.1.2 Podmínky či oblasti použití modelu**

Další kritérium dělení matematických modelů pneumatik.

Rozděluje modely pro:

- Ustálené stavy valení pneumatik. Pohyb pneumatiky pak dále rozdělujeme na:
  - nerovinný (boční smyk, řízení),
  - rovinný (čistá trakce – pohon, brždění),
  - kombinace dvou předchozích (jistém časovém intervalu).
- Neustálené (přechodové) valení pneumatiky pro pohyb. Dále rozdělujeme na:
  - rovinný (čistá trakce – pohon, brždění),

- nerovinný (boční smyk, řízení),
- kombinace předchozích dvou,
- při časově proměnlivém svislém zatížení.

### 3.1.3 Složitost modelu

Poslední kritérium dělení modelů, které velmi úzce souvisí s předchozími kritérii a odvíjí se především od přístupu k tvorbě modelu. Můžeme tedy dělit podle:

- **Fyzikální podstaty**
  - jednoduché,
  - složité.
- **Třecích poměrů v dotykové ploše na modely**
  - bez uvažování skluzů,
  - s uvažováním částečného či kombinovaného skluzu,
  - s uvažováním proměnného součinitele soudržnosti v závislosti na rychlosti jízdy a/nebo měrném zatížení pneumatiky.
- **Frekvenčního rozsahu na modely**
  - pro buzení nízkými frekvencemi (dlouhé vlny),
  - pro vysoké frekvence ( $>20$  Hz) a krátké vlny ( $<1$  m).

### 3.1.4 Příklady modelů pneumatik

Zde jsou uvedeny příklady modelů pneumatik:

- **Hrotový model** – nejjednodušší teoretický model kola, přesto však v oblasti svislé dynamiky vozidel (pérování) často používaný. Jedná se o model pneumatiky v radiálním směru, který popisuje pouze svislou sílu působící na kolo. Pneumatika je nahrazena hrotem připojeným přes lineární pružinu a případně paralelní tlumič k modelu neodpružené hmoty vozidla. Tento model je dobře použitelný za určitých podmínek. Obecně se používá spíše na povrchu s nižšími nerovnostmi (dobrá asfaltová nebo betonová vozovka).
- **Magické formule (Magic formulas)** – pro daný typ pneumatiky lze sestavit typické průběhy velikosti podélné síly, boční síly a vratného momentu na příslušném skluzu. Pro různá radiální zatížení lze dostat geometricky podobné průběhy, kde radiální zatížení je parametrem křivek. Pro odlišný typ pneumatiky dostaneme jiné absolutní hodnoty veličin, ale charakter křivek zůstává stejný. Na tomto je založen popis vlastností pneumatik označovaný také jako „magic formula“. Jejich parametry závisí na vlastnostech vozovky a typu pneumatik. Tyto hodnoty jsou zajišťovány experimentálně. Magické formule je tedy soustava matematických funkcí snažící se co nejlépe popsat experimentálně získané průběhy. Používají se pro popis podélné

a boční síly, vratného momentu při ustálených pohybových stavech pneumatiky za podmínek čistého podélného a bočního skluzu, nebo kombinovaného skluzu. Vstupními veličinami modelu jsou obvykle hodnoty svislé síly, úhlu odklonu kola a příslušných skluzů. K popisu charakteristik se často používají aproximační polynomy či speciální funkce. Matematické modely na základě magických formulí jsou široce známé a oblíbené pro popis chování pneumatik pro studium dynamických vlastností vozidel. Bylo publikováno mnoho verzí těchto modelů, nicméně mnohdy nejsou slučitelné jejich parametry. Výrazným subjektem v tvorbě magických formulí je holandské centrum pro výzkum dynamiky vozidel spolupracující s technickou univerzitou a koncernem TNO v Delftu. Zde také působil profesor Hans B. Pacejka, který byl asi nejvýznamnější osobou ve spojitosti s magickými formullemi právě pro jeho přínos v této oblasti. Tyto modely jsou k nalezení v softwarech pod názvy „MF-Tyre“ či „Delft-Tyre“. Využívají se k přímé implementaci do výpočetního systému pro dynamickou analýzu chování vozidel (např. ADAMS, SIMPACK, MADYMO).

- **Podobnostní metoda** – v angličtině „similarity method“ je zvláštní postup získávání matematických popisů. Vychází ze základních charakteristik naměřených při nominálních podmínkách a sady základních funkcí určujících především změnu skluzové tuhost v závislosti na zatížení. Poté násobením základních charakteristik a jejich posouváním ve vodorovném či svislém směru se postupně dojde k potřebným funkcím popisující charakteristiky při nenominálních podmínkách [3].

Jak již bylo zmíněno výše, matematické modely slouží spíše k detailním analýzám chování pneumatiky v souvislosti s dynamikou vozidel a pro jednodušší výpočty mohou být zbytečně složité. Proto není potřeba se jich držet, pokud právě chceme sestavit jednoduchý orientační výpočet který nám pomůže rychle zjistit alespoň přibližnou hodnotu nahuštění pneumatiky při určitých hodnotách teploty bez znalosti jejího přesného chování udávané výrobcem.

### 3.2 Výpočet na základě termomechaniky

Z geometrického hlediska se dá na pneumatiku nahlížet jako na uzavřený prstenec – toroid. Z hlediska mechanického je to tlaková nádoba, jejíž stěny tvoří pružná membrána. Pneumatiky jsou plněna vzduchem či dusíkem, tedy plyny, které mají různé chování při různých podmínkách.

Pokud však bude dodrženo dvou předpokladů a to:

- použití 1. zákona termodynamiky pro ideální plyn,
- množství vzduchu v pneumatice se nemění,

může být výpočet změny tlaku na základě změny teploty méně pracný a komplikovaný.

### 3.2.1 Aplikace Stavové rovnice ideálního plynu

V Americe existuje základní pravidlo pro pneumatiky osobních vozidel, kdy za každý měsíc klesne tlak o 1 psi a při každé změně okolní teploty o 10 °F se také změní tlak o 1 psi (přibližně 2 % celkového tlaku pneumatiky). Pro nákladní automobily platí totéž ovšem se jedná o změnu 2 psi. Toto je možné dohledat například z tohoto zdroje [18].

Toto tvrzení je však potřeba ověřit na jednotkách SI soustavy, a to za použití stavové rovnice ideálního plynu pro látkové množství  $n$  [5] [6].

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (5)$$

Kde:

$p$  [Pa] je počáteční tlak v systému

$V$  [m<sup>3</sup>] je objem systému

$n$  [mol] je látkové množství plynu

$R = 8,314$  [J · K<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>] je molární plynová konstanta

$T$  [°K] je teplota v systému

Z tohoto základního vztahu je možno vyjádřit potřebné veličiny. Jak již bylo výše zmíněno, vycházíme z předpokladu, že množství vzduchu v pneumatice se nemění. Proto můžeme látkové množství plynu položit rovno jedné  $n = 1$ . a odstranit ji z výpočtu.

Dále pak vztah pro výpočty na pneumatice:

$$p_{pneu} \cdot V_{vzd} = R \cdot T_{pneu} \quad (6)$$

Kde:

$p_{pneu}$  [Pa] je tlak v pneumatice

$V_{vzd}$  [m<sup>3</sup>] je objem vzduchu v pneumatice

$T_{pneu}$  [°K] je teplota pneumatiky

Nejprve je zapotřebí vyjádřit objem vzduchu v pneumatice při určitém tlaku a teplotě a to následovně:

$$V_{vzd} = \frac{R \cdot T_{pneu1}}{p_{pneu1}} \quad [\text{m}^3] \quad (7)$$



Kde:

$T_{pneu1}$  [°K] je výchozí teplota pneumatiky

S tímto lze vyjádřit tlak v pneumatice pro teplotu vyšší či nižší než výchozí:

$$p_{pneu2} = \frac{R \cdot T_{pneu2}}{V_{vzd}} \quad [\text{Pa}] \quad (8)$$

Kde:

$T_{pneu2}$  [°K] je teplota pneumatiky po změně

$p_{pneu2}$  [Pa] je tlak v pneumatice po změně

Z předešlých výpočtů je pak možno určit rozdíl tlaku v pneumatice vlivem změny teploty, který je vyjádřen následovně:

$$\Delta p_{pneu} = p_{pneu2} - p_{pneu1} \quad [\text{Pa}] \quad (9)$$

Jelikož se tlak v pneumatice měří většinou v barech a výpočty se provádějí v základních jednotkách, tedy v pascálech, je vhodné přepočítat rozdíl tlaku na bary. Přepočet vyjádřen následovně:

$$\Delta p_{pbar} = \Delta p_{pneu} \cdot 10^{-5} \quad [\text{bar}] \quad (10)$$

Kde:

$\Delta p_{pbar}$  [bar] je rozdíl tlaku v pneumatice

Následně lze určit procentuální změnu tlaku v pneumatice vlivem změny teploty.

$$\Delta p_{p\%} = \frac{\Delta p_{pbar}}{p_{pneu2} \cdot 10^{-5}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (11)$$

Kde:

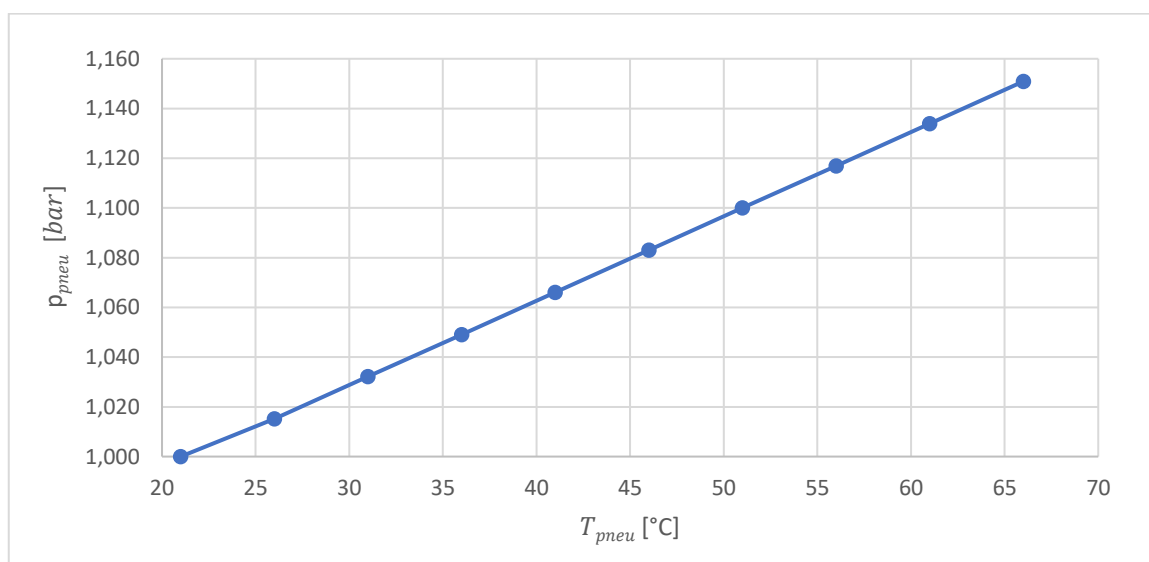
$\Delta p_{p\%}$  [%] je procentuální změna tlaku

Tímto způsobem byly vypočítány následující hodnoty v tabulce níže.

**Tabulka 4 – Výpočet hodnot změn tlaku při změně teploty za použití stavové rovnice plynu**

	R	$p_{pneu}$ [bar]	$p_{pneu}$ [Pa]	$V_{vzd}$ [m <sup>3</sup> ]	$T_{pneu}$ [°C]	$T_{pneu}$ [°K]		
1.	8,314	1,000	100000	0,0245	21	294,15	$\Delta p_{pbar}$ [bar]	$\Delta p_{p\%}$ [%]
2.	8,314	1,015	101515,637	0,0245	26	299,15	0,017	1,697
3.	8,314	1,032	103212,371	0,0245	31	304,15	0,017	1,697
4.	8,314	1,049	104909,106	0,0245	36	309,15	0,017	1,697
5.	8,314	1,066	106605,841	0,0245	41	314,15	0,017	1,697
6.	8,314	1,083	108302,576	0,0245	46	319,15	0,017	1,697
7.	8,314	1,100	109999,310	0,0245	51	324,15	0,017	1,697
8.	8,314	1,117	111696,045	0,0245	56	329,15	0,017	1,697
9.	8,314	1,134	113392,780	0,0245	61	334,15	0,017	1,697
10.	8,314	1,151	115089,514	0,0245	66	339,15	0,017	1,697

Z těchto hodnot byl dále vytvořen graf závislosti změny tlaku na změně teploty.



**Graf 9 – Závislost změny tlaku na změně teploty**

Z výsledků je patrné že změna tlaku v závislosti na teplotě má lineární charakter. Dále také je z hodnot patrné, že s každým přírůstkem teploty o 5 °C se dle výpočtu změní tlak v pneumatice o 0,017 bar. Jedná se tedy změnu tlaku o 1,697 % což je blízko 2 % tak jak již bylo v práci zmíněno. Nicméně se toto chování může lišit v závislosti na typu pneumatiky a vozidla pro které je pneumatika určena. Tento výpočet je vhodný pro pneumatiky, o kterých nemáme žádné předešlé informace a můžeme zjistit pouze základní parametry nutné pro tento výpočet.

### 3.2.2 Aplikace Charlesova zákona

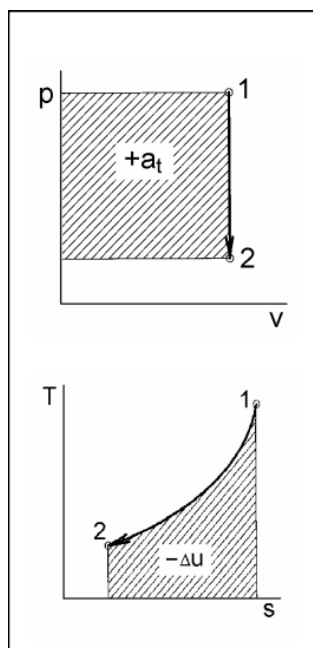
Při dodržení dvou předchozích výchozích předpokladů a to použití 1. termodynamického zákona a také předpokladu že množství vzduchu se v pneumatice nemění, můžeme aplikovat Charlesův zákon, resp. izochorickou změnu ideálního plynu. Tlak plynu je lineární funkcí teploty při stálém objemu. Rozpínavost plynů je pro všechny stejná. Další informace ohledně stavových veličin lze dohledat z tohoto zdroje [6].

Charlesův zákon lze pak vyjádřit tímto vztahem [6]:

$$\frac{p}{T} = \text{konst.}, \text{ nebo také } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (12)$$

Kde:

$p_1$	[bar]	je tlak na začátku změny
$T_1$	[°C]	je teplota na začátku změny
$p_2$	[bar]	je tlak na konci změny
$T_2$	[°C]	je teplota na konci změny



Obrázek 9 - P-V a T-S Diagramy izochorické změny [5]

Tento vztah lze použít v situaci, kdy známe nějaké parametry pneumatiky, například optimální provozní teplotu pneumatiky, optimální nahuštění při určité teplotě nebo je potřeba zjistit výchozí nahuštění, aby po zahřátí měla pneumatika optimální parametry.

Dále je možno upravit vztah pro použití na pneumatikách takto:

$$\frac{p_{p1}}{T_{t1}} = \frac{p_{p2}}{T_{p2}} \quad (13)$$

Kde:

$p_{p1}$  [bar] je tlak v pneumatice před zahřátím

$T_{p1}$  [°C] je teplota pneumatiky před zahřátím

$p_{p2}$  [bar] je tlak pneumatiky po zahřátí

$T_{p2}$  [°C] je teplota pneumatiky po zahřátí

Z předchozího vztahu lze pak vyjádřit optimální tlak v pneumatice při optimální provozní teplotě a to takto:

$$p_{opt} = \frac{p_{p1}}{T_{t1}} \cdot T_{p2} \quad [\text{bar}] \quad (14)$$

Kde:

$p_{opt}$  [bar] je tlak v pneumatice při optimální provozní teplotě

Je také možné vyjádřit již výše zmíněný výchozí tlak huštění před zahřátím pneumatiky a to takto:

$$p_{vych} = \frac{p_{p2}}{T_{t2}} \cdot T_{p1} \quad [\text{bar}] \quad (15)$$

Kde:

$p_{vych}$  [bar] je výchozí tlak pneumatiky.

Tento výpočet, jak již bylo zmíněné lze nejlépe použít, pokud jsou známy nějaké informace o pneumatice před měřením. Dále lze také použít pro již naměřené hodnoty teploty a tlaku pneumatiky.

## 4. Validace výpočtu pomocí experimentu měřením

### 4.1 Měření vlastností pneumatiky nákladního vozidla

#### 4.1.1 Úvod měření

Experiment se uskutečnil na ploše Centra bezpečné jízdy Libros Ostrava. Na této ploše je možno simulovat podmínky pro jízdu všech kategorií vozidel za kritických fyzikálních a adhezních podmínek díky technologii skrápění asfaltového povrchu speciálními tryskami.

Měření se provádělo zároveň s testy kritického brzdění a také testy stability vozidla. Bylo prováděno jak na suchém povrchu, tak i na povrchu z kropeném vodou, pro simulaci mokré vozovky. Vše probíhalo v létě, za sucha a slunečna.

#### 4.1.2 Subjekt měření

Měření probíhalo na dvou typech pneumatiky určené pro nákladní vozidla a to:

- **Continental Conti CrossTrac HS3**
  - terénní (stavební) pneumatika,
  - bezdušová, radiální,
  - rozměr 385/65 R22,5.



Obrázek 10 - Continental Conti CrossTrac HS3

- **Continental Conti Hybrid HS3**

- letní (silniční),
- bezdušová, radiální,
- rozměr 385/65 R22.5.



Obrázek 11 - Continental Conti Hybrid HS3

Tyto pneumatiky byly měřeny na nákladním hasičském voze Scania P440.



Obrázek 12 - Scania P440

### 4.1.3 Měřicí přístroje

Pro měření tlaku v pneumatice a teploty pláště před testováním, následně pak i při testování byly použity tyto měřicí přístroje:

- Plnič pneumatik s digitálním manometrem **EXTOL PREMIUM RP 120D**
  - stupnice: psi, bar, kPa, Kg/cm<sup>2</sup>,
  - maximální pracovní tlak: 8 bar (0,8 MPa),
  - rozlišení: 0,05 bar,
  - napájení: 2 x AAA baterie [17].



Obrázek 13 - EXTOL PREMIUM RP 120D

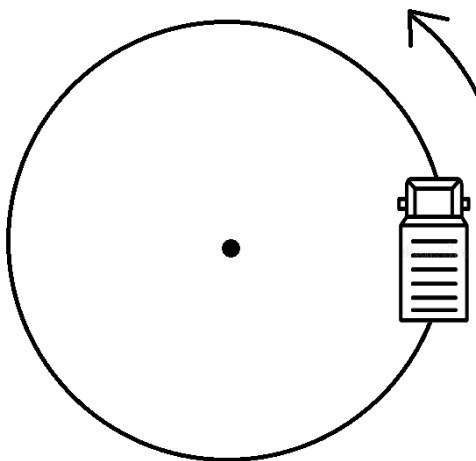
- Vpichový teploměr **Longacre AccuTech**
  - přesné, rychlé měření,
  - vpichová sonda pro pneumatiky,
  - maximální teplota měření: 500 °C,
  - měření možno v °F nebo °C [16].



Obrázek 14 - Longacre AccuTech™

#### 4.1.4 Průběh měření

Testování bylo prováděno ve dvou fázích, nejdříve z jednou sadou pneumatik, následně pak s druhou sadou. Takto byly prováděny testy stability vozidla v zatáčce, kdy se udržovala konstantní rychlost v levotočivém kruhu, tak jak je vidět na obrázku níže.



Obrázek 15 - Levotočivé kroužení

Měření se provádělo na třech místech pláště (vnitřní strana, prostředek běhounu, vnější strana) vpichovým teploměrem. Takto se měřilo nejdříve levé kolo, následně pak pravé kolo. Poté se změřila změna tlaku uvnitř pláště pomocí manometru. Naměřeny byly tyto hodnoty uvedeny v tabulkách 5–8:



**Tabulka 5 – Naměřené hodnoty teploty pneumatik Continental Conti CrossTrac HS3**

Conti CrossTrac HS3 3885/65 R 22,5					
LP			PP		
Teplota [°C]			Teplota [°C]		
Vnější	Střed	Vnitřek	Vnější	Střed	Vnitřek
40	41	42	45	47	46
47	59	56	52	53	50
54	62	57	54	64	57
51	65	59	55	68	59

**Tabulka 6 – Naměřené hodnoty teploty pneumatik Continental Conti Hybrid HS3**

Conti Hybrid HS3 385/65 R22,5					
LP			PP		
Teplota [°C]			Teplota [°C]		
Vnější	Střed	Vnitřek	Vnější	Střed	Vnitřek
46	57	56	48	50	46
55	62	62	66	62	53
56	61	57	60	60	53

Následoval podobný test na smáčené vozovce, kdy bylo simulováno kroužení na mokru. Pro tento test byly použity pneumatiky druhé sady, tedy pneumatiky Continental Conti Hybrid HS3.

**Tabulka 7 – Naměřené hodnoty teploty pneumatik Continental Conti Hybrid HS3 (mokra)**

Conti Hybrid HS3 385/65 R22,5					
LP			PP		
Teplota [°C]			Teplota [°C]		
39	41	43	53	52	48
39	45	48	50	50	50

Toto měření bylo kratší, jelikož se nezměnil charakter vlastností pozorované spolu s tímto měřením. Následně byly pro další výpočty naměřené hodnoty zprůměrovány na celkovou teplotu pláště pro určitou hodnotu tlaku, přidány výchozí podmínky a naměřené hodnoty tlaku pneumatik.

Takto pak vypadají tabulky vycházející z naměřených hodnot:

**Tabulka 8 – Zpracované hodnoty z měření pro pneumatiku Continental Conti CrossTrac HS3**

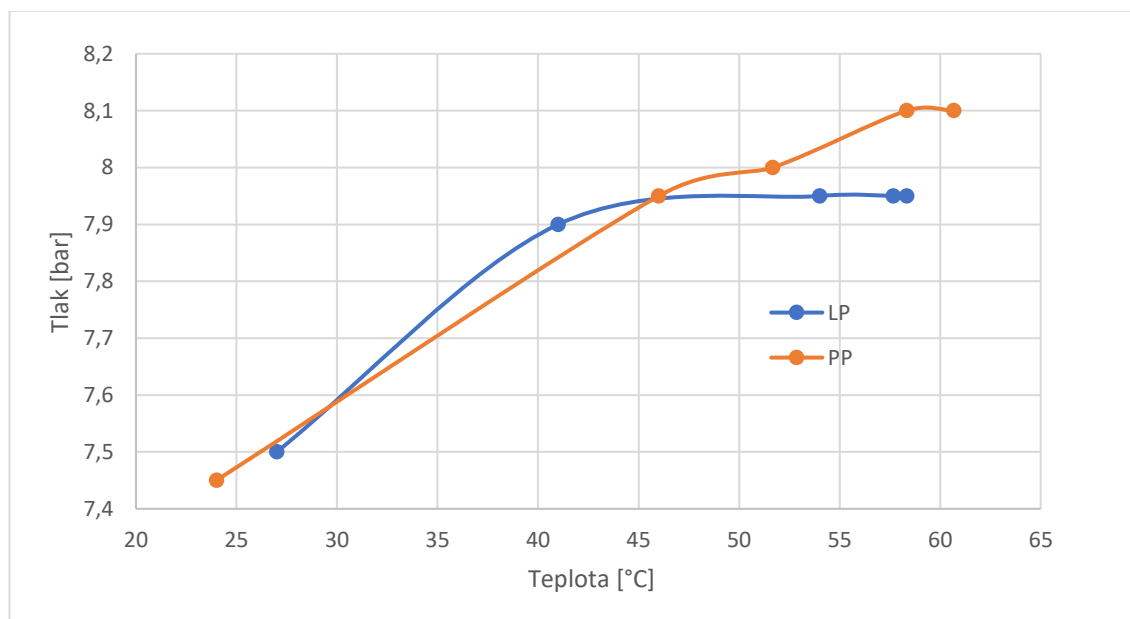
Conti CrossTrac HS3 3885/65 R 22,5			
LP		PP	
Teplota [°C]	Tlak [bar]	Teplota [°C]	Tlak [bar]
27	7,5	24	7,45
41,00	7,9	46,00	7,95
54,00	7,95	51,67	8
57,67	7,95	58,33	8,1
58,33	7,95	60,67	8,1

**Tabulka 9 – Zpracované hodnoty z měření pro pneumatiku Continental Conti Hybrid HS3**

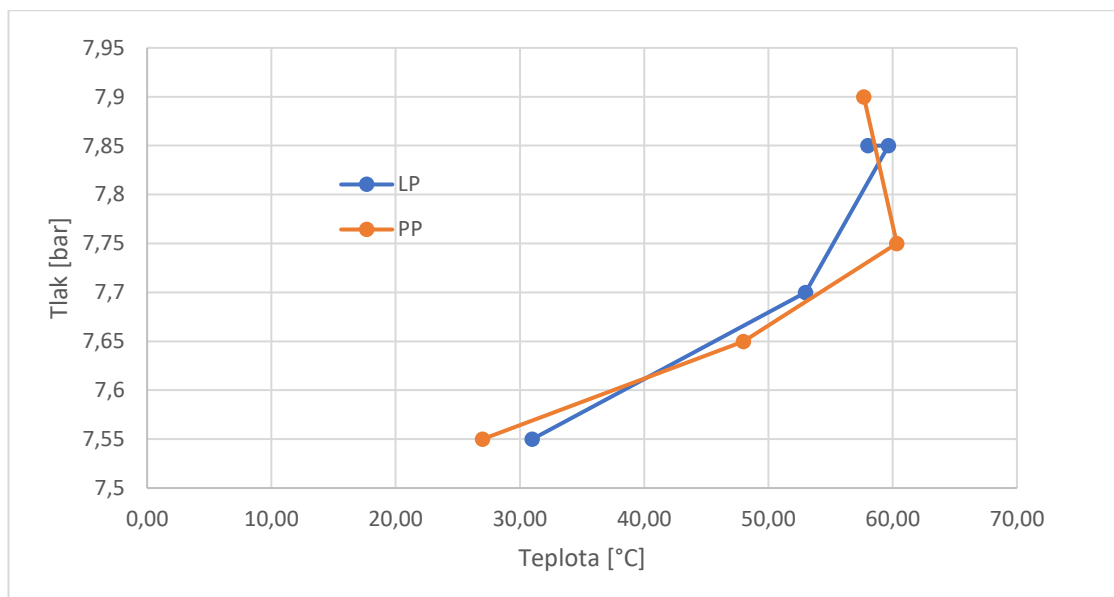
Conti Hybrid HS3 385/65 R22,5			
LP		PP	
Teplota [°C]	Tlak [bar]	Teplota [°C]	Tlak [bar]
31,00	7,55	27,00	7,55
53,00	7,7	48,00	7,65
59,67	7,85	60,33	7,75
58,00	7,85	57,67	7,9

Jelikož naměřených hodnot při simulaci mokré vozovky je málo, nejsou příliš průkazné, proto již dále nejsou použity.

Hodnoty z tabulek pro tento test byly zavedeny do grafu závislosti teploty na tlaku pneumatiky pro obě sady pneumatik.



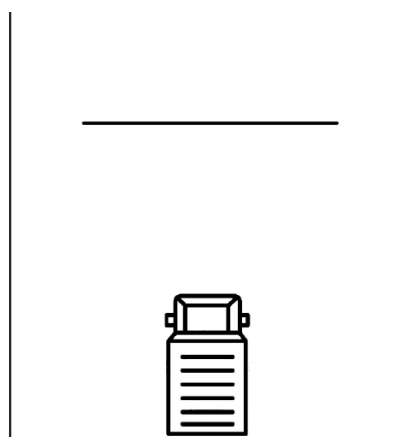
**Graf 10 – Závislost teploty na tlaku pneumatiky Continental Conti CrosTrac HS3**



**Graf 11 – Závislost teploty na tlaku pneumatiky Continental Conti Hybrid HS3**

Z grafu pro model pneumatiky CrossTrac HS3 je patrné že v důsledku levotočivého kroužení teplota i tlak rostou rychleji na pravé pneumatice, která je při tomto testu více zatěžována než pneumatika levá. Naopak na grafu pro model pneumatiky ContiHybrid HS3 je patrné, že zde mohla být přítomná chyba měření, nebo vliv elementu, který mohl zkreslit výsledky měření. Jedním z těchto elementů může být náhlé zchlazení běhounu přejezdem přes kaluž vody, kdy pak následná naměřená teplota běhounu neodpovídá tlaku v pneumatice, která je zahřátá uvnitř, tudíž má větší tlak, než by odpovídal v závislosti na teplotě běhounu za běžných podmínek.

Bylo také provedeno měření při testu kritického brzdění. Tento test spočíval v rozjezdu vozidla na 50 km/h, kdy na označeném místě byl plně sešlápnut brzdový pedál a měřila se vzdálenost kterou urazilo vozidlo od tohoto označeného místa.



**Obrázek 16 – Test kritického brzdění**

Tento test se prováděl pouze na pneumatikách Continental ContiHybrid HS3, kde byly naměřeny tyto hodnoty:

**Tabulka 10 – Naměřené hodnoty teploty pneumatiky Continental ContiHybrid HS3 při testu kritického brždění.**

Conti Hybrid HS3 385/65 R22,5					
LP			PP		
Teplota [°C]			Teplota [°C]		
42	46	50	38	40	38
33	32	34	37	36	35
30	29	31	35	34	34

Tak jako u předešlých hodnot i tyto hodnoty byly dále upraveny, tedy udělán průměr teploty pneumatiky při daném okamžiku. Dále byl přidán do tabulky naměřený tlak pneumatiky pro dané měření teplot. Takto vypadá finální tabulka z tohoto měření.

**Tabulka 11 – Zpracovaná tabulka hodnot z měření při testu kritického brždění**

Conti Hybrid HS3 385/65 R22,5			
LP		PP	
Teplota [°C]	Tlak [bar]	Teplota [°C]	Tlak [bar]
46,00	7,85	38,67	7,85
33,00	7,80	36,00	7,85
30,00	7,80	34,33	7,85

Z těchto dat je možné vidět, že teplota naměřena na běhounu klesá, nicméně tlak je naměřen stále stejný. Tento jev byl způsoben průběžným přejížděním přes kaluže mezi jednotlivými měřeními. Pro správné fungování brzd bylo potřeba brzdy udržovat v určitém rozmezí teplot, proto bylo potřeba brzdy, tudíž celé kolo zchladit pro možnost rychlého pokračování v testování. Toto mělo negativní vliv na měření teplot běhounu, jelikož ten byl rovněž ochlazen. Jak již bylo zmíněno dříve, naměřený tlak tedy neodpovídá teplotě naměřené na běhounu. Proto jsou tyto hodnoty velice zkreslené a nevyhovující pro validaci.

## 4.2 Měření vlastností pneumatiky vozu Formula Student

### 4.2.1 Úvod měření

Měření mělo především za cíl simulovat nahřívání pneumatiky na přímém slunci či jiném zdroji tepla, které je schopno zahřát celou pneumatiku pozvolně na všech místech zároveň a také určit úbytek vzduchu opakovaným měřením manometru.

Toto měření bylo prováděno v budově CPIT v areálu VŠB-TU Ostrava. K přesnému zahřívání pneumatiky na určitou teplotu a setrvání na této teplotě bylo využito temperovací pece.

### 4.2.2 Subjekt měření

Měření se provádělo na závodní pneumatice typu slick vozidla Formula Student teamu Formula TU Ostrava.

Testována byla pneumatika **Continental C18 Formula Student** těchto vlastností:

- pneumatika s hladkým dezénem – slick,
- bezdušová, radiální,
- rozměr 205/470 R13.



Obrázek 17 – Continental C18



Obrázek 18 – Monopost Formula Student

#### 4.2.3 Měřicí přístroje

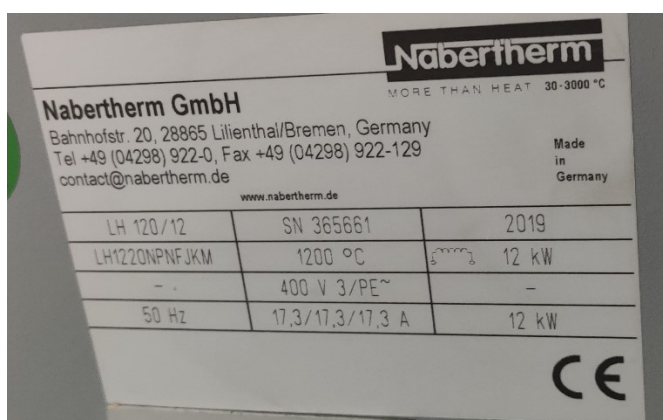
K měření teploty a tlaku pneumatiky bylo použito stejného vybavení uvedeného v kapitole 4.1.3. Jak již bylo zmíněno dříve, pro zahřívání pneumatiky byla použita temperovací pec **Nabertherm 30-3000 °C** která má tyto parametry:

- velký rozsah teplot,
- nastavitelná křivka zahřívání,

- nastavitelná rychlost zahřívání,
- rovnoměrné zahřívání.



Obrázek 19 – Temperovací pec Nabertherm



Obrázek 20 – Štítek pece Nabertherm

#### 4.2.4 Průběh měření

Pneumatika byla umístěna do pece a postupně zahřívána. Na každé úrovni teploty byla ponechána alespoň 10 minut, aby bylo zajištěno dostatečné prohřátí celé pneumatiky. Vždy bylo přidáno 10 °C, poté se pec zahřála a jakmile se dostala na stanovenou úroveň teploty, setrvala zde po nastavenou dobu.

Vždy po uplynutí stanovené doby byla pec otevřena a naměřeny hodnoty teplot pláště, a tlaku v pneumatice. Poté byla pec opět uzavřena a zablokována. Následně byla stanovena nová úroveň teploty a celý proces byl opakován.



**Obrázek 21 – Pneumatika umístěná v peci**

Zde byli zjištěny dva nedostatky této konkrétní metody měření, které souvisí z realizací a nástroji. Prvním, jak jde vidět z obrázku 21 je to že pneumatika byla položena na plechu který bohužel během měření odebíral teplo pneumatice, která tedy byla zespod zahřívána méně než z ostatních stran. Druhým pak bylo měření tlaku pneumatiky nasazovacím manometrem na ventil pneumatiky. Pokud nedošlo k jeho přesnému nasazení, bylo upuštěno více vzduchu, než bylo nezbytně nutné. Toto způsobilo pokles tlaku a došlo k lehkému zkreslení výsledků posledních dvou měření.

Tímto způsobem měření byly zjištěny hodnoty uvedeny v tabulce.

**Tabulka 12 – Naměřené hodnoty pro pneumatiky Continental C18**

Vozidlo	Monopost Formula Student		
Plášť	Continental C18 Formula Student		
Teplota [°C]			Tlak [bar]
Vnější	Střed	Vnitřek	
21	21	21	1
26	26	26	1,1
30	30	28	1,15
33	33	30	1,15
38	37	33	1,2
40	41	37	1,2
52	52	47	1,3
60	58	53	1,35
64	62	60	1,4
74	72	66	1,45

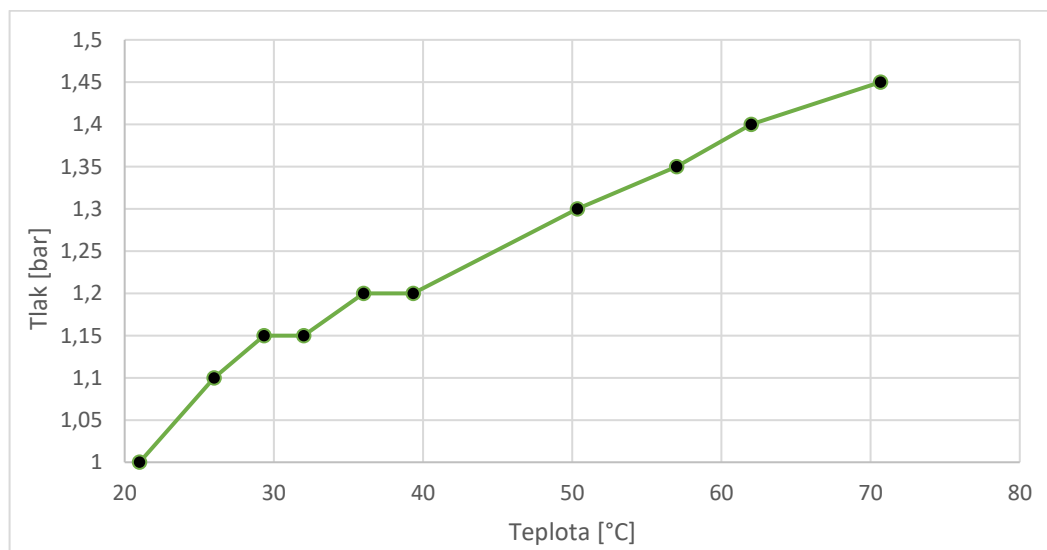
Jak již bylo dříve zmíněno, z hodnot jde vidět, že vnitřní strana pneumatiky (spodní strana dle její orientace) je zahřívána pomaleji, a následně při vyšších teplotách má i střed pneumatiky o stupeň až dva nižší teplotu. Zkreslené výsledky již nebyly v tabulce uváděny.

Tak jako v předešlém měření, z naměřených hodnot teploty byl udělán průměr a hodnoty opět vloženy do tabulky.

**Tabulka 13 – Zpracované hodnoty měření pro pneumatiku Continental C18**

Monopost Formula Student	
Continental C18 Formula Student	
Teplota [°C]	Tlak [bar]
21	1
26	1,1
29	1,15
32	1,15
36	1,2
39	1,2
50	1,3
57	1,35
62	1,4
71	1,45

Následně z těchto hodnot byl vytvořen graf závislosti tlaku v pneumatice na její teplotě.



**Graf 12 – Závislost změny tlaku na změně teploty pro pneumatiku Continental C18**

Jak je z grafu patrné, hodnoty mají téměř lineární průběh, což je příhodné pro další výpočetní kroky a vypočítání hodnot tlaku či teploty v daném bodě křivky. Nelinearity jsou způsobeny především rozlišením manometru. Dále byla také naměřen úbytek tlaku



v pneumatice vlivem opakovaného měření manometrem. Naměřené hodnoty lze vidět v tabulce níže.

**Tabulka 14 – Pokles tlaku v důsledku opakovaného měření manometrem.**

Pořadí měření	Tlak [bar]	Pořadí měření	Tlak [bar]
1.	1,2	14.	1,15
2.	1,2	15.	1,15
3.	1,2	16.	1,15
4.	1,2	17.	1,15
5.	1,2	18.	1,15
6.	1,2	19.	1,15
7.	1,2	20.	1,15
8.	1,2	21.	1,1
9.	1,15	22.	1,1
10.	1,15	23.	1,1
11.	1,15	24.	1,1
12.	1,15	25.	1,1
13.	1,15	26.	1,1

Z tabulky lze vidět že změna tlaku proběhla mezi 8. a 21. měřením. Zde byl pokles tlaku dohromady o 0,1 bar. Následný pokles tlaku měřením můžeme vypočítat takto:

$$p_{pokles} = \frac{\text{Počet měření}}{\text{Rozdíl tlaku}} \quad [\text{bar}] \quad (16)$$

Kde:

$p_{pokles}$  [bar] je pokles tlaku za jedno měření

Pro toto konkrétní měření je pak pokles  $p_{pokles} = 0,0071$  [bar] což je pokles přibližně o 0,7 % tudíž se tlak zásadně nemění.

## 5 Popis předpokládaných změn souvisejících se změnou tlaku v pneumatice

### 5.1 Změny tlaku pneumatiky u nákladního vozidla

Z naměřených dat pro pneumatiky **Continental Conti CrossTrac HS3** a **Continental ContiHybrid HS3** bylo možné pozorovat, že v závislosti na míře zatížení při jízdách zkouškách roste teplota a zároveň tlak pneumatiky v různých úrovních. Pravá přední pneumatika byla více zatížena než levá, proto charakteristika pro pravé kolo dosahuje vyšších hodnot.

Byl proveden výpočet dle kapitoly 3.2.2 pro toto měření tak, aby vypočtené hodnoty odpovídaly hodnotám měření. Aby toto bylo splněno, bylo potřeba zavést koeficient  $\gamma$ . Jedná se o korekční součinitel zvýšení tlaku huštění vlivem teploty pláště. Pak dle vzorce (14) je možno tlak v pneumatice vypočítat takto:

$$p_{opt} = \frac{p_{p1}}{T_{t1}} \cdot T_{p2} \cdot \gamma \quad [\text{bar}] \quad (17)$$

Kde:

$\gamma$        $[-]$       je korekční součinitel tlaku v pneumatice

Aby bylo možné tento vzorec použít nějakým jednoduchým, v praxi velmi rychle použitelným způsobem, pro určení změny tlaku vlivem změny teploty u různých pneumatik, je nutné zavést korekční součinitel.

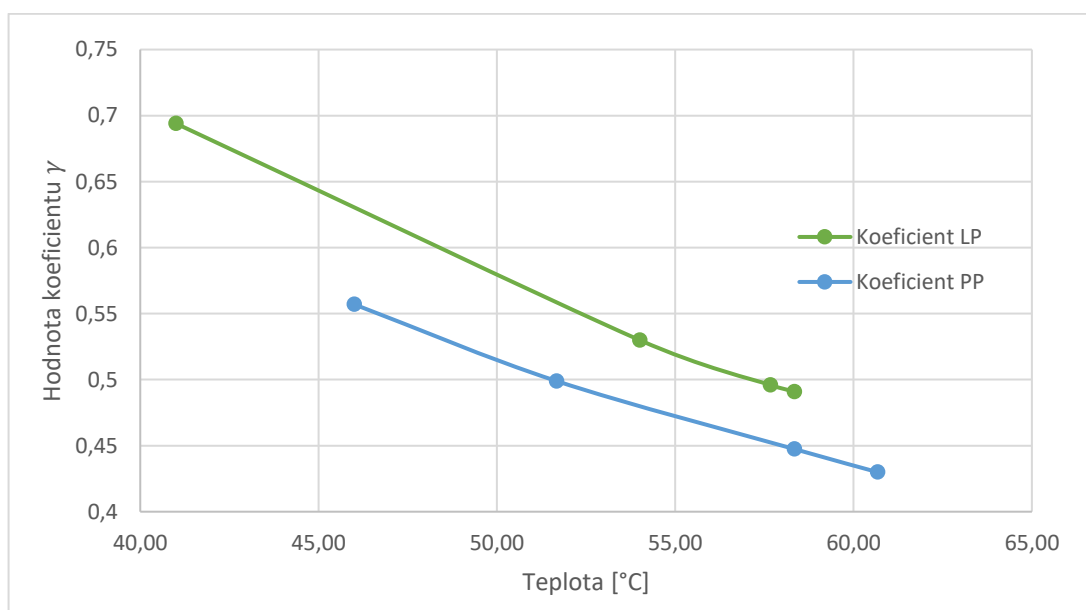
Použití korekčního součinitele zjednoduší skutečnost, že každá pneumatika při změně teploty a tlaku reaguje svou roztažností rozdílně. Je tedy nutné ověřit, jak moc velké jsou tyto rozdíly, a najít jisté kompromisní číslo, které bude použitelné a výsledek zjednodušeného výpočtu zároveň dostatečně zpřesní.

Dle tohoto byly zpracovány následující hodnoty, které jsou zavedeny do tabulky:

**Tabulka 15 – Určení korekčního koeficientu  $\gamma$  pro pneumatiku Continental Conti CrossTrac HS3**

Conti CrossTrac HS3 3885/65 R 22,5			
LP		PP	
Teplota [°C]	Tlak [bar]	Teplota [°C]	Tlak [bar]
27,00	7,50	24,00	7,45
41,00	7,90	46,00	7,95
54,00	7,95	51,67	8,00
57,67	7,95	58,33	8,10
58,33	7,96	60,67	8,10
Koeficient $\gamma$ LP		Koeficient $\gamma$ PP	
0,694		0,557	
0,53		0,499	
0,496		0,448	
0,491		0,430	
Medián			
0,513		0,473	
Průměr		0,49	

Z hodnot v tabulce byl vytvořen graf závislost teploty na velikosti korekčního koeficientu  $\gamma$ :



**Graf 13 – Závislost koeficientu  $\gamma$  na teplotě pro pneumatiku Continental Conti CrossTrac HS3**

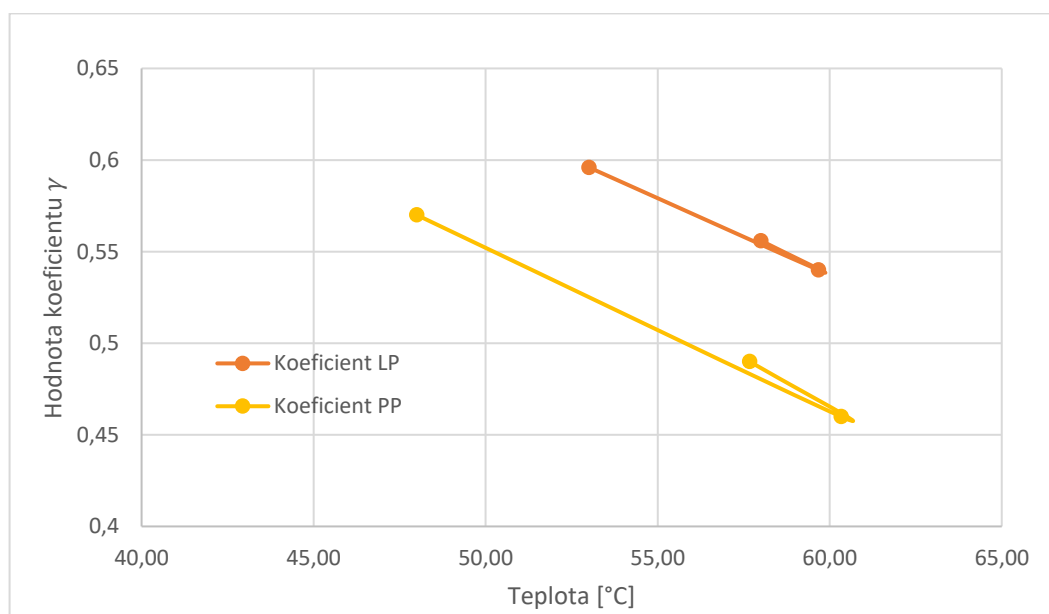
Z grafu je patrné, že koeficient  $\gamma$  pro více zatíženou pravou pneumatiku má průběh závislosti na teplotě níže položenou než méně zatížená pneumatika levá. To může být způsobeno vyšší rozdílem mezi teplotami a rychlejším nárůstem teploty než u pneumatiky levé. Byl stanoven medián (střední hodnota) koeficientu  $\gamma$  pro obě pneumatiky. Tyto hodnoty koeficientu zastupují obě strany spektra, kdy hodnota  $\gamma = 0,473$  může být použita pro pneumatika která podléhá vyššímu zatížení při provozu, kdežto hodnota  $\gamma = 0,513$  pro pneumatiku zatíženou méně. Průměrná hodnota koeficientu  $\gamma$  je pak pro tuto

pneumatiku  $\gamma = 0,49$ . Hodnoty by měly být platné pro pneumatiky stejného rozměru, konstrukce a určení.

Stejný výpočet byl proveden i pro druhý typ testované pneumatiky pro nákladní vozidlo. Hodnoty pak byly zpracovány do této tabulky.

**Tabulka 16 - Určení korekčního koeficientu  $\gamma$  pro pneumatiku Continental ContiHybrid HS3**

Conti Hybrid HS3 385/65 R22,5			
LP		PP	
Teplota [°C]	Tlak [bar]	Teplota [°C]	Tlak [bar]
31,00	7,55	27,00	7,55
53,00	7,69	48,00	7,65
59,67	7,85	60,33	7,76
58,00	7,85	57,67	7,90
Koeficient $\gamma$ LP		Koeficient $\gamma$ PP	
0,596		0,570	
0,54		0,460	
0,556		0,490	
Medián			
0,556		0,490	
Průměr		0,52	



**Graf 14 - Závislost koeficientu  $\gamma$  na teplotě pro pneumatiku Continental ContiHybrid HS3**

Z grafu je opět vidět že koeficient  $\gamma$  pro více zatíženou pravou pneumatiku má průběh závislosti na teplotě níže položenou než méně zatížená pneumatika levá. Obě křivky jsou téměř paralelní. To může být způsobeno vlastnostmi pneumatiky, jejich zatížením či nedostatkem výpočetních dat.

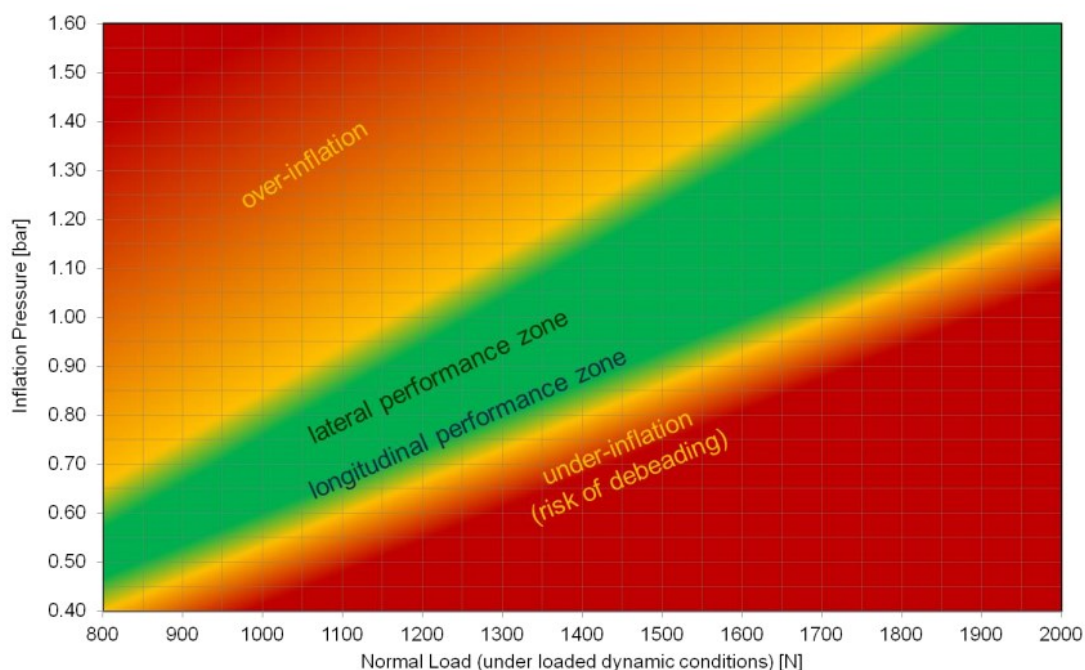
Opět byl stanoven medián (střední hodnota) koeficientu  $\gamma$  pro obě pneumatiky. Tyto hodnoty koeficientu jsou opět pro obě pneumatiky. Jednu zatíženou více a druhou méně v závislosti na průběhu testu. Hodnota koeficientu  $\gamma=0,49$  je pro více zatíženou pneumatiku, kdežto hodnota  $\gamma=0,556$  pro pneumatiku zatíženou méně. Mezi hodnotami je větší rozptyl než u předchozího testu, což je možné vidět i ve vzdálenosti mezi oběma křivkami v grafech.

Průměrná hodnota koeficientu  $\gamma$  je pak pro tuto pneumatiku  $\gamma = 0,52$ .

Hodnota je vyšší než u předchozího typu pneumatiky. Může to být vlivem směsi pneumatiky, kdy tato směs by měla být měkčí, jelikož je pneumatika určena na silnici, kdežto předchozí, jak již bylo zmíněno dříve v práci je označována jako terénní. Hodnota by měla být opět platná pro pneumatiky stejného rozměru, konstrukce a určení.

## 5.2 Změna tlaku u pneumatiky pro monopost Formula Student

U tohoto typu pneumatiky velice záleží na tlaku huštění a její teplotě. Jelikož oba tyto parametry velice ovlivňují jízdní vlastnosti této pneumatiky. Pokud je možno zjistit potřebné informace před jízdou a pneumatiky připravit tak aby měli optimální podmínky při jízdě může to velice pozitivně ovlivnit výsledky na trati. Výrobce vydává dokument k těmto pneumatikám, který popisuje správné huštění pneumatiky a veličiny ovlivňující jejich výkon (především přilnavost) a také rady pro jejich správné použití. Mimo jiné tento dokument také obsahuje data potřebné pro matematické modely pneumatik a také soubory pro výpočetní a simulační software. Bližší informace k těmto pneumatikám lze dohledat z tohoto zdroje [22].



Obrázek 22 – Optimální pracovní „okno“ huštění pneumatiky Continental C18 [22].

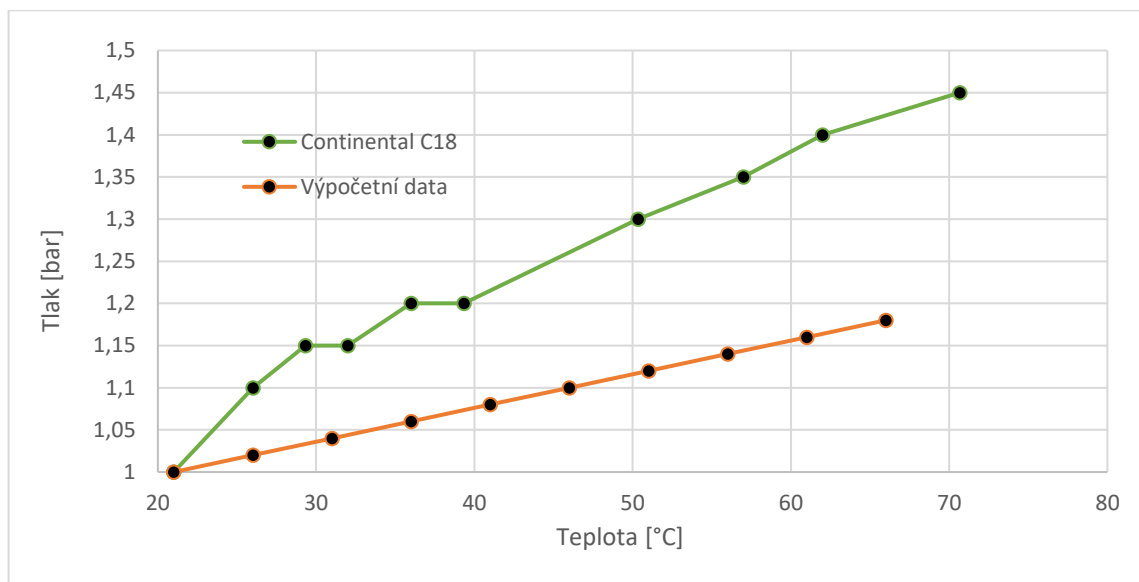
Výše na obrázku 22 je znázorněna závislost tlaku huštění na zatížení pneumatiky. Tento diagram popisuje parametry, při kterých dosahuje pneumatika nejlepších výsledků a také parametry kdy dochází k přehuštění a podhuštění pneumatiky s rizikem sezutí pláště z ráfku. Zelená část diagramu je optimální pracovní „okno“ pneumatiky, kdy v této oblasti má pneumatika nejlepší vlastnosti při daných hodnotách huštění a zatížení. Dle barevné škály pak lze vidět vlevo nahoře červenou zónu kdy dochází k přehuštění, a naopak v pravé spodní části dochází k podhuštění a je zde již zmíněné riziko sezutí pláště z ráfku.

Jak již bylo v práci dříve vyjádřeno, je zde pravidlo, které tvrdí že každá změna o 5 °C změni tlak v pneumatice přibližně o 1,7 % což je zde 0,017 bar. Pokud pro jednodušší porovnání zvolíme změnu o celá 2 %, udělá nám to změnu přibližně 0,02 bar. Toto pravidlo bylo vyjádřeno v kapitole 3.2.1 této práce, kde výsledkem také byl graf závislosti změny tlaku na změně teploty. Tato závislost vykreslila graf v lineární podobě. Při měření na pneumatice Continental C18 se ukázalo, že průběh závislosti změny tlaku na změně teploty má také lineární charakter. Je možno tedy zkusit porovnat tento test s výpočtem. Níže lze vidět tabulku hodnot teploty a tlaku vycházející z již zmíněného pravidla. Tabulka začíná stejnými hodnotami jako naměřená charakteristika.

**Tabulka 17 – Vypočtené hodnoty pro pneumatiku Continental C18**

<b>Continental C18 Formula Student</b>	
<b>Teplota [°C]</b>	<b>Tlak [bar]</b>
21	1
26	1,02
31	1,04
36	1,06
41	1,08
46	1,1
51	1,12
56	1,14
61	1,16
66	1,18

Z hodnot uvedených v tabulce byla následně vytvořena křivka závislosti změny tlaku na teplotě, nicméně už čistě z charakteru výpočtu lze předpokládat že má lineární průběh. Tato křivka byla přidána ke křivce naměřené experimentem popsáném v kapitole 4.2.4.



**Graf 15 – Porovnání naměřené a vypočtené charakteristiky pro pneumatiku Continental C18**

Jak lze z tohoto grafu vidět, charakteristiky jsou si podobné, nicméně při měření stoupal vnitřní tlak se stoupající teplotou podstatně rychleji, než uvádí výpočet. Tento jev může být způsoben tím, že konkrétně tato pneumatika je pro závodní účely, kdo se od ní vyžaduje, co jak nejrychleji se dostat na optimální teplotu, tedy zahřát se co nejrychleji bez poškození a výrazného snížení životnosti a zde pak setrvat. Kdežto pravidlo vyjádřené ze stavové rovnice ideálního plynu je spíše určeno pro pneumatiky silničních vozidel pro použití na běžných vozovkách, kde rychlé zahřátí je spíše negativním jevem.

## 6 Závěr

### 6.1 Shrnutí

Tématem práce bylo popsat vliv teploty vozidlového pláště na jeho charakteristické vlastnosti, seznámit s touto problematikou a vytvořit jednoduchý výpočetní model který je případně použitelný v praxi.

Práce je rozdělena na pět základních částí. V první části byl zpracován především úvod do problematiky a vyčleněny základní pojmy dle platných norem. Druhá část práce popisuje konstrukci pneumatiky, její hlavní prvky a jejich popis, rozdíly mezi jednotlivými typy pneumatik a také rozdíly mezi jejich výrobou. Dále jsou zde popsány deformační charakteristiky pneumatik a vlastnosti s nimi související. Byl zde zmíněn valivý odpor, rozebrána problematika správného skladování a stárnutí pneumatiky a konečně také vliv tlaku a teploty v pneumatice na její vlastnosti.

V třetí části byly zmíněny matematické modely pneumatik, jejich rozdělení, složení a také použití. Na základě termomechaniky byly vytvořeny jednoduché výpočetní modely pro výpočet změny tlaku v závislosti na změně teploty pneumatiky. V části čtvrté byly provedeny testy na třech typech pneumatik, kdy dvě jsou z nákladního vozidla a jedna z vozidla závodního. Jsou zde popsány procesy a podmínky jednotlivých měření, použita měřidla, popsány naměřené hodnoty a vykresleny jejich průběhy. V poslední části byly popsány souvislosti, předpokládané změny a výsledky měření s výpočty.

V práci byly stanoveny korekční koeficienty tlaku v pneumatice pro všechny měřené subjekty, jak je možné vidět v tabulce 18.

**Tabulka 18 – Korekční koeficienty  $\gamma$  pro měřené pneumatiky**

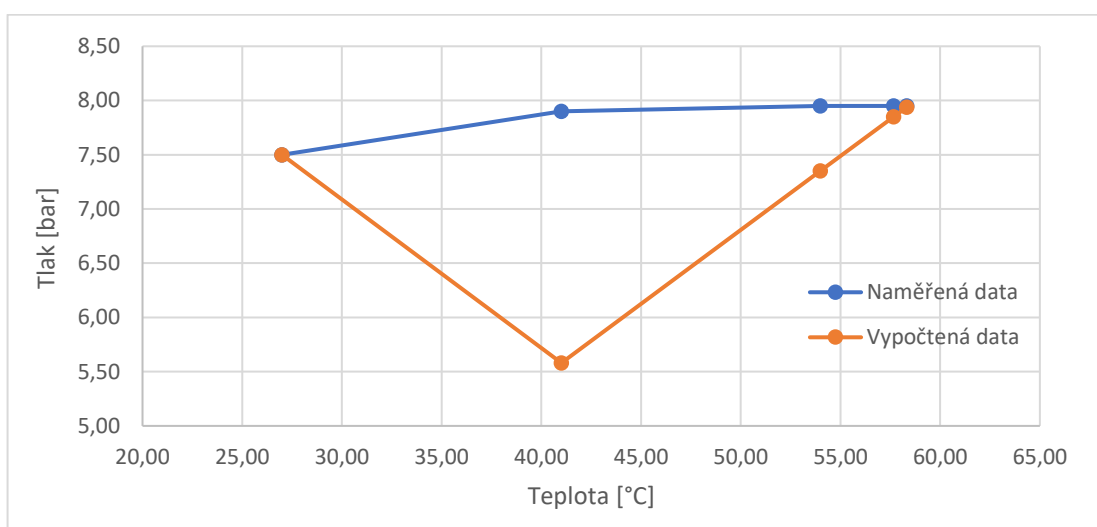
Pneumatika	Koeficient $\gamma$ LP	Koeficient $\gamma$ PP	Průměrná hodnota $\gamma$
Conti CrossTrac HS3	0,51	0,47	0,49
Conti Hybrid HS3	0,56	0,49	0,52
Continental C18	/	/	0,58

Pro pneumatiky bylo zpracováno porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými za použití zjištěné hodnoty koeficientu  $\gamma$  a rozdíl těchto hodnot je vyjádřen v procentech. Níže lze vidět zastoupení tohoto výpočtu na konkrétní pneumatice.



**Tabulka 19 – Porovnání naměřených hodnot s vypočtenými za použití korekčního koeficientu pro pneumatiku Continental Conti CrossTrac HS3**

Conti CrossTrac HS3					
Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty			
Teplota [°C]	Tlak [bar]	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Koeficient $\gamma$	Rozdíl v %
27,00	7,50	27,00	7,50	0,49	/
41,00	7,90	41,00	5,58		29,4
54,00	7,95	54,00	7,35		7,5
57,67	7,95	57,67	7,85		1,3
58,33	7,95	58,33	7,94		0,1



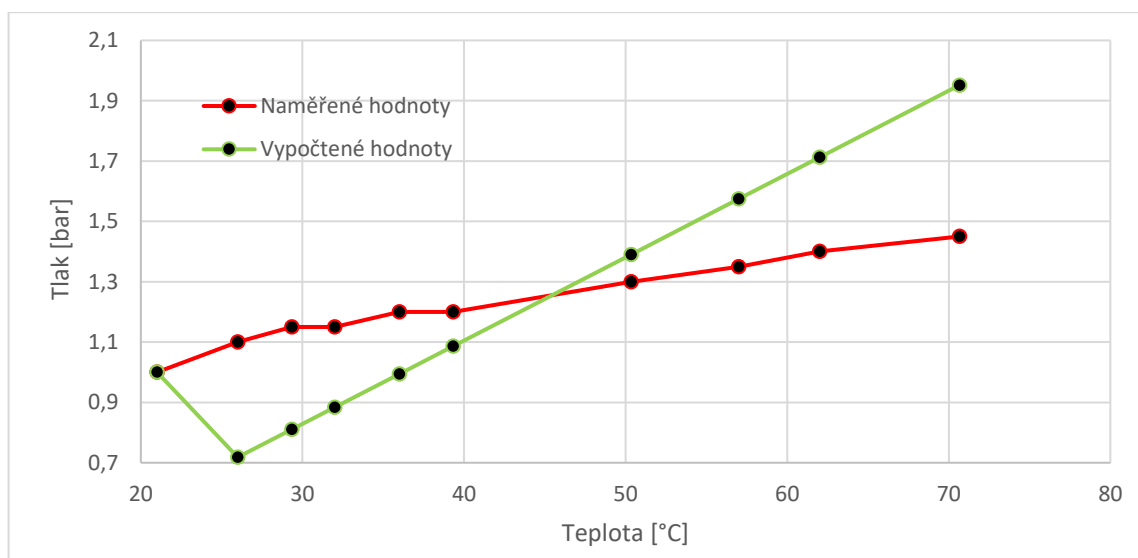
**Graf 16 – Porovnání naměřených dat s vypočtenými daty za použití koeficientu  $\gamma$  pro nákladní pneumatiku**

Z porovnání je patrné, že korekční koeficient může při nižších teplotách udělat velký rozdíl ve vypočteném tlaku v pneumatice. Proto je vhodné provést více měření a hodnotu koeficientu  $\gamma$  v závislosti na nich upravit.

Předmětem měření byla také pneumatika typu Slick, konkrétně pneumatika Continental C18 závodního vozidla. Pro tuto pneumatiku byla stanovena hodnota koeficientu  $\gamma$  a to hodnota  $\gamma = 0,58$ . Vypočtené hodnoty, naměřené hodnoty a jejich rozdíl v procentech lze opět najít v tabulce níže.

**Tabulka 20 - Porovnání naměřených hodnot s vypočtenými za použití korekčního koeficientu pro pneumatiku Continental C18**

Continental C18 Formula Student					
Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty			
Teplota [°C]	Tlak [bar]	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Koeficient $\gamma$	Rozdíl v %
21	1	21	1,00	0,58	/
26	1,1	26	0,72		34,7
29	1,15	29	0,81		29,6
32	1,15	32	0,88		23,1
36	1,2	36	0,99		17,1
39	1,2	39	1,09		9,5
50	1,3	50	1,39		6,9
57	1,35	57	1,57		16,6
62	1,4	62	1,71		22,3
71	1,45	71	1,95		34,6



**Graf 17 – Porovnání naměřených dat s vypočtenými daty za použití koeficientu  $\gamma$  pro závodní pneumatiku**

I pro toto měření platí to, co u měření předchozího. Hodnota koeficientu není ideální pro všechny naměřené teploty pneumatiky, proto je opět doporučeno provést více měření a korekční koeficient upravit.

## 6.2 Závěrečná doporučení

V rámci praktické části bylo realizováno množství měření, při nichž byla zjištěna řada faktorů, které mohou nepříznivě zasáhnout do přesnosti měření a věrohodnosti dat. Jednalo o situaci, kdy při testu kritického brždění popsaném v kapitole 4.1.4. docházelo k zchlazení běhounu zároveň s potřebným chlazením brzd předních kol. Tato skutečnost vedla ke zkreslení výsledků měření, jelikož pneumatika byla vnitřně zahřátá. Následně byla vpichovým pyrometrem naměřena na běhounu hodnota neodpovídající skutečné teplotě

pneumatiky. K potlačení tohoto nežádoucího jevu doporučuji provádět chlazení brzd pomalou jízdou a dochladit brzdy přirozeně, nebo použít proud vzduchu směřovaný pouze na brzdy vozidla.

Při měření zahřívání pneumatiky, kdy zahřívání bylo realizováno v temperovací peci (popis v kapitole 4.2.4), bylo k měření tlaku v pneumatice použito manometru s nástrčnou koncovkou na ventil pneumatiky. Jelikož v peci bylo omezené místo, orientace ventilu nebyla přívětivá, docházelo k nesprávnému nasazení manometru na ventil. Tím došlo k upuštění vzduchu v pneumatice a následně ke snížení tlaku, což zkreslilo výsledky měření. K potlačení či eliminaci tohoto problému navrhuji použít hadici našroubovanou přímo na ventil a připojovat se k této hadici mimo vnitřní prostor pece. Další možností je připojit manometr a nechat ho připojený po celou dobu měření, nebo použít kontinuálního bezdrátového měření tlaku umístěného přímo uvnitř pneumatiky.

Měřením bylo také zjištěno, že je-li měření prováděno zařízením pro bezkontaktní měření teploty (infračerveného záření), dochází k nepřesnosti vlivem barvy nebo materiálu měřeného tělesa. Obtížné měřitelné materiály jsou ty s nízkou emisivitou. Většinou se jedná o lesklé, třpytivé kovové povrchy jako například hliník, kdy není možné určit přesnou teplotu. Toto lze eliminovat za použití dotykového případně vpichového pyrometru, nebo použití např. tmavé lepicí pásky která je schopna vydržet na místě i po zahřátí a bude mít stejnou teplotu jako materiál pod ní který potřebujeme změřit.

Doporučuji také provádět pouze testy z jedním záměrem, či testovat takovým způsobem, aby jedna testovaná vlastnost nijakým způsobem nezasahovala do výsledku druhé testované vlastnosti.

### **6.3 Využitelnost výsledků a doporučení pro další rozvoj problematiky**

Z této práce může potencionálně čerpat team Formula Student – Formula TU Ostrava, kdy na závodech této soutěže, které se team účastní probíhá řada disciplín. Vozidlo je připravováno na jednotlivé disciplíny vždy v boxu a poté přepraveno do prostoru k danému závodisti. Problém nastává v situacích, kde je výrazný rozdíl teplot v boxu a v prostoru trati.

Pro fungování podvozku a pneumatik je totiž tlak ve své podstatě nejdůležitější, a tedy jsou nutné jeho občasné korekce. Díky jednoduchému výpočtu vycházejícího z poznatků této práce lze odhadnout, jaký rozdíl teplot má výraznější vliv na tlak v pneumatice.

Ještě výraznější je pak výhoda v situaci, kdy jsou zakázány jakékoliv způsoby nahřívání pneumatik. Vozidlo, které vyjíždí na trať má teplotu pneumatik např. 35 °C, avšak po prvním kole se pláště ohřejí na teplotu až 70 °C, což výrazně změní tlak. Tato teplota je jednoduše

zjistitelná a díky tomuto výpočtu je možné stanovit nutný počáteční tlak před jízdou, aby po ohřátí byl tlak v pneumatikách optimální, nebo se mu alespoň blížil.

Další možné měření by mohlo být realizováno s použitím bezkontaktních snímačů měření teploty (infračervených snímačů) během jízdy tam kde by bylo možné tyto snímače uchytit, nejlépe v blízkosti měřené pneumatiky. Toto měření je schopno dynamicky ukázat zahřívání pneumatik v závislosti na jízdním stylu, nastavení podvozku a tak podobně. Při použití tří snímačů na jednu pneumatiku a správném seřízení je možno měřit na třech místech pneumatiky stejně jako při použití vpichového pyrometru. S tímto se také nabízí použít bezdrátového snímání tlaku v pneumatice za použití snímačů umístěných přímo uvnitř pneumatiky. Jedná se o systém TPMS, který je používán v novějších automobilech na kontrolu poklesu tlaku. Tento systém by se dal použít pro kontinuální snímání změny tlaku vlivem změny teploty. Oba tyto způsoby měření by se přes systém zapisování dat (datalogger) zapisovali v závislosti na čase a byly ukládány na jeho vnitřní paměť. S těmito daty se dá následovně pracovat, propojit s ostatními měřenými daty z jízdy vozidla a dále je posuzovat dle potřeby.

Vzhledem k charakteru výpočtu se nabízí také možnost provést výpočty za použití Van der Waalsovy rovnice pro reálný plyn či rovnic vycházejících z Van der Waalsovy rovnice. Dále také existuje možnost využití simulačních softwarů či použití matematických modelů pro pneumatiky.

## **Poděkování**

Chtěl bych zde poděkovat především svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubovi Šmirusovi, Ph.D., za pomoc a rady při psaní práce, zprostředkování měření souvisejících s prací a také za trpělivost při zpracování této práce. Také bych chtěl poděkovat rodině za podporu a poskytnuté zázemí, kolegům z projektu Formula Student týmu Formula TU Ostrava za pomoc při vypracování této práce a mé poděkování patří také vedoucímu tohoto projektu prof. Ing. Aleši Slívovi, Ph.D. za pomoc, zkušenosti a rady při studiu.

## 7 Seznam použité literatury

- [1] VLK, F. Podvozky motorových vozidel. Nakladatelství a vydavatelství VLK, První vydání, Brno, 2000. ISBN 80-238-5274-4.
- [2] MARCÍN, Jiří a Petr ZÍTEK. *Pneumatiky: Gumárenské výroby 1*. 1. Praha: SNTL, 1985.
- [3] DOČKAL, Vladimír, Jan KOVANDA a František HRUBEC. *Pneumatiky*. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1998.
- [4] MATĚJKA, CSC., doc. Ing. Rostislav. *Vozidla silniční dopravy I*. 1. Vysoká škola dopravy a spojov v Žilině: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1988.
- [5] KADLEC, Zdeněk. *Termomechanika: návody do cvičení*. 2. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1736-1.
- [6] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac., V Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2409-5.
- [7] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon 133/2011 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů (zákon o silničním provozu), ve znění pozdějších předpisů, a některé další zákony. In: 2011. 2011, 51 (25. 5. 2011).
- [8] ČSN 63 1001. *Pneumatiky – Termíny a definice*. 1. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005.
- [9] ŠIROKÝ, Ph. D, Ing. Jaromír. *Studijní opory: Pohyb silničních vozidel*. 1. VŠB-TU Ostrava, 2015.
- [10] ŠMIRAUS Ph. D, Ing. Jakub. *Brzdy a pneumatiky závodních vozidel: Syllabus k předmětu: Vybrané přednášky z konstrukce závodních vozidel*. 1. VŠB-TU Ostrava, 2017.
- [11] BREWER, H. Keith, Samuel K. CLARK, Joe M. GINGO, Clarence HERMANN, J. Michael HOCHSCHWENDER a D. Richard STEPHENS, N. GENT, Alan a Joseph D. WALTER, ed. *The Pneumatic Tire*. 1. USA: U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2006.
- [12] Continental Tire. *History of the Passenger Tire* [online]. 2020 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://continentaltire.com/learn/history-passenger-tire>
- [13] Racing slick. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2018 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Racing\\_slick](https://en.wikipedia.org/wiki/Racing_slick)

- [14] ROAD TYRES VS. SLICK TYRES. *Tyres Northampton: Performance Centre* [online]. United Kingdom, 2019 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.tyresnorthampton.com/news/road-tyres-vs-slick-tyres/>
- [15] Continental radí: správným skladováním můžete podstatně prodloužit životnost pneumatik. *Continental: Pneumatiky* [online]. 26.9.2018 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.continental-pneumatiky.cz/osobni/tiskovy-servis/tiskove-zpravy/2018-09-26-skladovani-pneumatik>
- [16] Longacre AccuTech™: Pyrometer. *Longacre Racing: Racing products* [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.longacreracing.com/products.aspx?itemid=1721&prodid=7298&pagetitle=AccuTech™-Economy-Pyrometer>
- [17] EXTOL PREMIUM RP 120D: Plnič pneumatik s digitálním manometrem. *EXTOL-CZ* [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.extol-cz.cz/naradi-pneumaticke-naradi-pneumaticke-pistole/plnic-pneumatik-s-digitalnim-manometrem-extol-premium-8865065#box-popis>
- [18] Air pressure, Temperature fluctuations. *Tire Rack* [online]. United states of America, 2020 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.tirerack.com/tires/tiretech/techpage.jsp?techid=73&fbclid=IwAR0k0qZ0Qp242ybis8W0r4488VhPx9f5gOWfpAgV4xM9rltNBv9LFsAW2V4>
- [19] KORDÁRNA PLUS A. S. Kordové tkaniny. *Kordárna* [online]. 2017, 2017 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://www.kordarna.cz/kordove-tkaniny/>
- [20] Z čeho se vyrábí pneumatiky. *PneuPoradna* [online]. 2015, 13.11.2015 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://pneuporadna.cz/vse-o-pneu/z-ceho-se-vyrabi-pneumatiky>
- [21] CLARKE, Pat. Tyres: Pat's Corner. *Formula Student Germany: FSG* [online]. Sydney, 2006, 2006 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/tyres/>
- [22] *Continental Formula Student Tire: Competition Tire 2018 (C18) – Documentation*. 1. Continental Reifen Deutschland GmbH, 2018. Dostupné také z: [www.conti-online.com](http://www.conti-online.com)